

# Akumulace elektrické energie

<b>Obsah.....</b>	<b>1</b>
<b>Seznam zkratk.....</b>	<b>1</b>
<b>10.1 Úvod do problematiky .....</b>	<b>2</b>
10.2 Rozdělení akumulačních systémů .....	3
10.3 Akumulační soustavy jejich popis .....	6
10.3.1 Požadavky na výkon .....	6
10.3.2 Akumulační kapacita .....	6
10.3.3 Počet pracovních cyklů .....	7
10.3.4 Rychlost u reakčních cyklů nabíjení a vybíjení .....	7
10.3.5 Fáze přeměny .....	7
10.3.6 Mechanické akumulační systémy .....	8
10.3.7 Elektrochemická přeměna akumulace .....	15
10.3.8 Chemická akumulace .....	26
10.3.9 Tepelná akumulace .....	28
10.3.10 Elektrická akumulace .....	29
<b>10.4 Závěrečné hodnocení akumulátorových systémů .....</b>	<b>31</b>
<b>10.5 Akumulační systémy vhodné pro energetiku .....</b>	<b>33</b>
10.5.1. Baterie pro primární účely .....	34
10.5.2 Baterie pro sekundární činnosti .....	34
<b>10.6. Akumulační systémy vhodné pro OZE .....</b>	<b>34</b>
10.6.1 Specifikace vhodných akumulátorových systémů .....	34
<b>10.7 Otázky a úkoly .....</b>	<b>38</b>
<b>10.8. Literatura .....</b>	<b>39</b>

## Seznam zkratk

ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
CAES	Compressed Air Energy Storage – energie stlačeného vzduchu
AA-CAES	Adiabatic Advanced - Compressed Air Energy Storage
SCESS	Super Capacitor Energy Storage System ( Superkapacitor )

## 10.1. Úvod

Tato kapitola se bude snažit čtenáři přiblížit problémy spojené s akumulací elektrické energie, ale také utvořit představu o současných možnostech na poli poznání o systémech uskladňující velmi potřebnou formu energie. Kapitola nemá za cíl vytvořit kompletní univerzální matematický aparát pro použití s jakoukoliv aplikací. Tento úkol je nutné tvořit vždy s konkrétním umístěním instalace a jednotný návod proto neexistuje. Čtenář by měl po přečtení získat základní představu a uvažování o akumulačních systémech jako celku, pochopit jejich problematiku a být schopen samostatně posoudit vhodnost použití akumulátorů na konkrétní instalace.

Otázka ukládání elektrické energie je stejně stará jako sám objev elektřiny. Již od dob Alessandra Volty a Andrého M. Ampéra probíhaly různé pokusy s akumulací elektrické energie. Důležité si je na úvod uvědomit, že není vhodné zaměňovat slova baterie a akumulátor, protože se tyto výrazy významově liší. Několikrát během tohoto textu se bude skloňovat slovo akumulace, akumulátor nebo akumulační baterie. Obvykle je slovo baterie vnímáno jako galvanický článek nebo elektrochemický akumulátor, vhodný do ručních svítilen apod. Zde se slovo baterie může objevit ve významu akumulačního prostředku, popřípadě akumulačních prostředků (baterie je vlastně souprava několika článků). Nebude-li uvedeno jinak.

Pojem akumulace elektrické energie lze přeložit jako hromadění či zásoba elektrické energie nebo jako uchování energie pro její pozdější využití ve vhodné kvalitě a kvantitě. V současné době je nejrozšířenějším akumulačním médiem olověný akumulátor. Většina z nás ho zná především v automobilech. Někdy se můžeme setkat také s pojmem primární baterie. Tím je myšlena skutečnost, že článek je schopen dodávat energii bez prvotní disociace – tzv. suché články (klasicky známé monočlánky). Naopak sekundární druh potřebuje prvotní nabití. V následujících pasážích se budeme věnovat pouze sekundárním druhům.

Akumulační systémy jsou z hlediska výroby a spotřeby elektrické energie nezastupitelné. Elektřina je komodita z principu velice problematická a jakékoliv snahy o její distribuci naráží na problém okamžité poptávky a nabídky. Akumulátory, respektive skladiště energie, jsou v současné době stále ve vývoji. Nicméně máme možnosti, jak elektřinu s poměrně dobrou účinností skladovat.

Problematika akumulace je v současné době skloňována především s řešením v oblasti eliminace diskontinuity dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů a vychází z principů jednotlivých alternativních zdrojů energie a z problémů spojenými s časově proměnlivým výkonem těchto zdrojů.

V současné době je tedy akumulace důležitá ze dvou důvodů:

- optimálně začlenit OZE do sítě,
- připravit se na tzv. chytré sítě (smart grid), které v budoucnu převezmou funkci dnešních sítí.

## 10.2. Rozdělení akumulčních systémů

Akumulační systémy lze rozdělit do několika skupin a podskupin, dle atributů, které popisují jejich vlastnosti a určují jejich použití. Tyto atributy jsou uvedeny níže. Akumulační systémy je možné rozdělit i na další skupiny, které již však nejsou tak významné pro energetiku.

Akumulace velkých objemů elektrické energie je dnes v převážné většině uskutečňována pomocí přečerpávacích elektráren. Přečerpávací elektrárny jsou velkým akumulátorem a pro dnešní energetiku v podstatě jediným možným řešením. Jestliže někdo namítá, že tato funkce je vcelku zbytečná a drahá, že stačí např. v nočních hodinách snížit výkon elektráren, ten není obeznámen s problematikou energetiky, zejména pak s fyzikálními podmínkami najíždění a odstavování turbosoustrojí.

Na základě uvedených skutečností můžeme konstatovat, že akumulace je jedním ze základních problémů dnešní energetiky. Pokud je již celkem uspokojivě vyřešena výroba energie tzn. její výroba v normálním zatížení vzhledem k dennímu diagramu zatížení, pak zejména špičkový provoz a náhlé propady (výkyvy) spotřeby – dodávky, stále představují problém, který je nutné urychleně vyřešit.

Naše elektrizační soustava je propojena s evropskou. Její zkratka je ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). V rámci propojených elektrizačních soustav funguje tzv. solidárnost, což znamená, že v době špiček, tzn. v náhlých propadech nebo nárustech spotřeby energie si jednotlivé elektrizační soustavy vypomohou krátkou stimulací. Zde se fakticky dostáváme do konfliktu s ekonomickou stránkou věci, neboli cena za 1 MWh energie v záskoku je přibližně 2x až 3x vyšší než běžná cena za elektrickou energii.

Akumulační soustavy můžeme rozdělit podle:

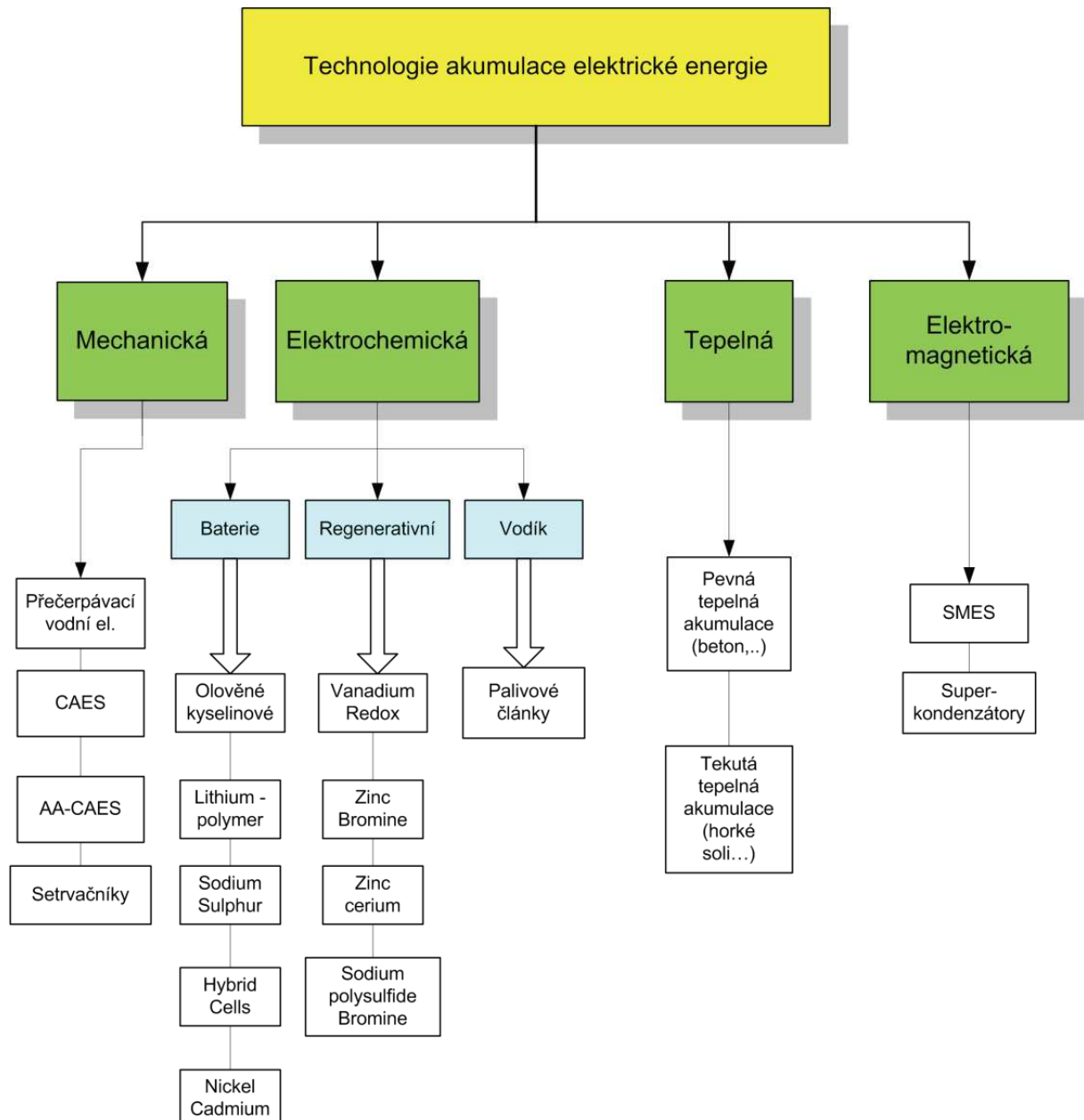
- a) Požadovaného výkonu
  - Okamžitý
  - Záložní
- b) Akumulační kapacity
  - Malá
  - Střední
  - Velká
- c) Fáze přeměny při akumulaci
  - Homogenní
  - Heterogenní
- d) Počtu cyklů
  - Denní
  - Týdenní
  - Celoroční
  - Nepravidelná
- e) Formy ukládání energie

- Přímou
- Nepřímou

f) Rychlosti a reakční rychlosti u nabíjení a vybíjení

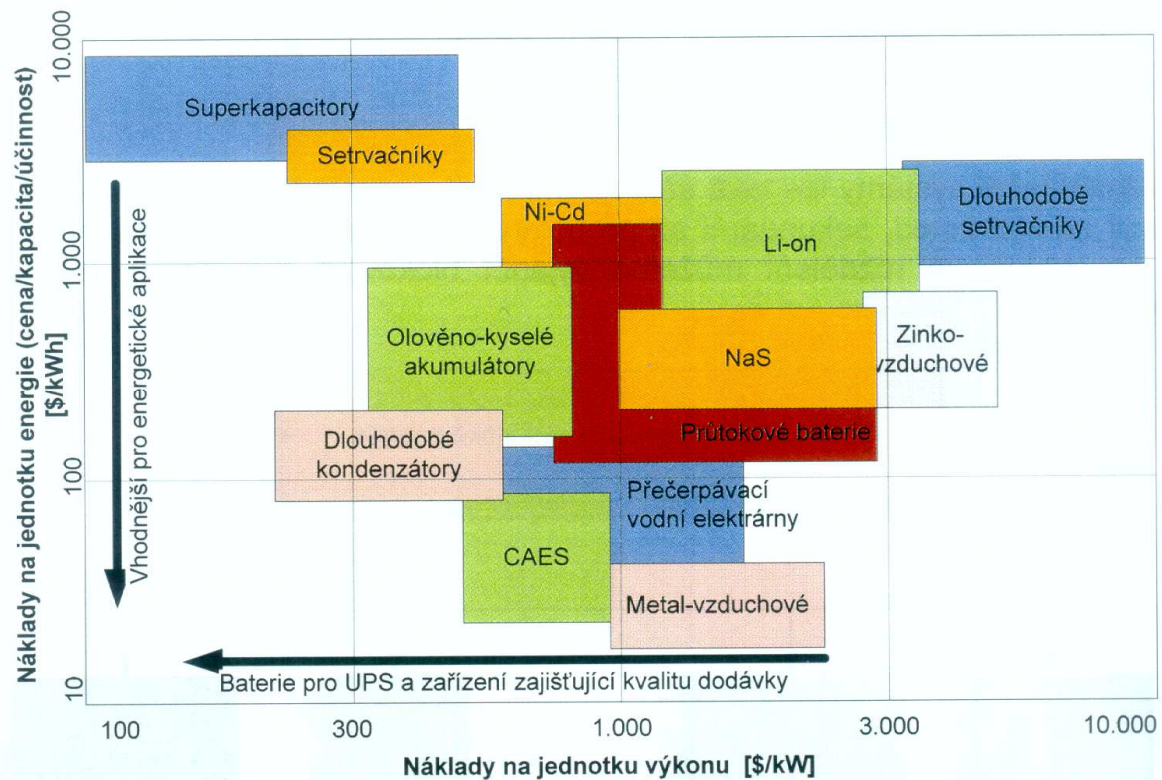
- Pomalá
- Rychlá

Akumulační systémy lze také dělit na primární a sekundární. Primární mohou dodávat energii ihned, sekundární až po polarizaci elektrod (prvotně se musí nabít). Technologické rozdělení můžeme vyjádřit blokovým diagramem (obrázek 10.1).

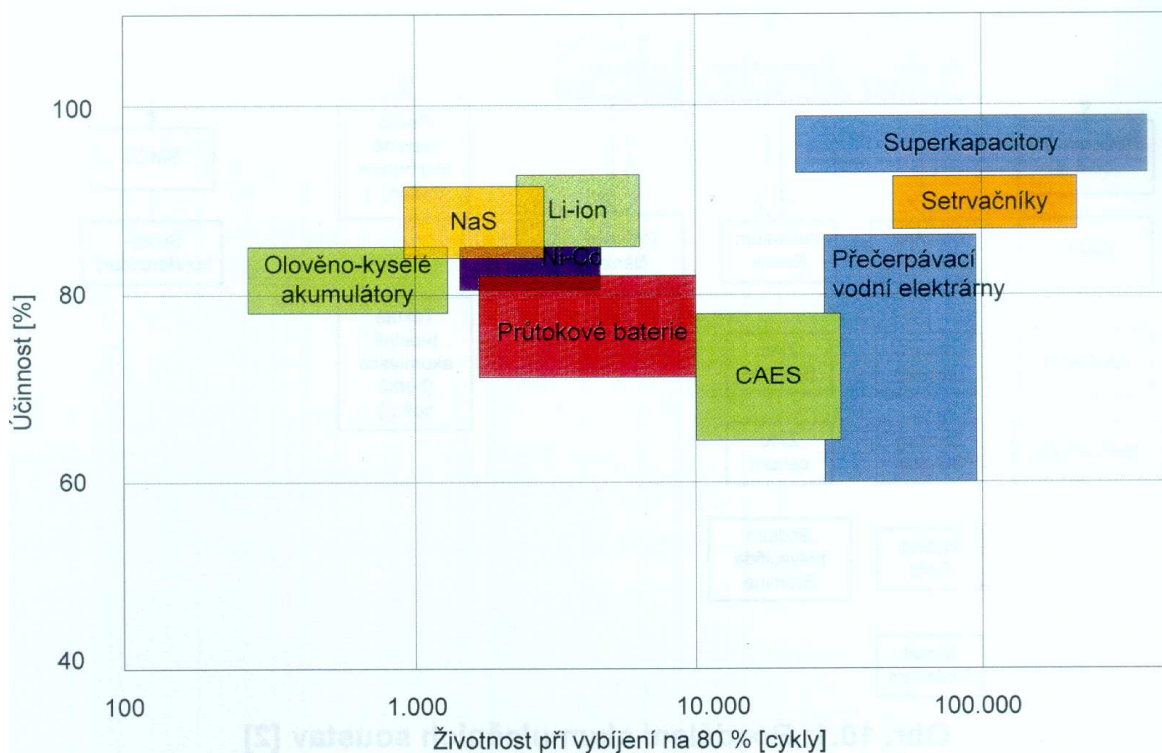


**Obr. 10.1: Rozdělení akumulačních soustav [2]**

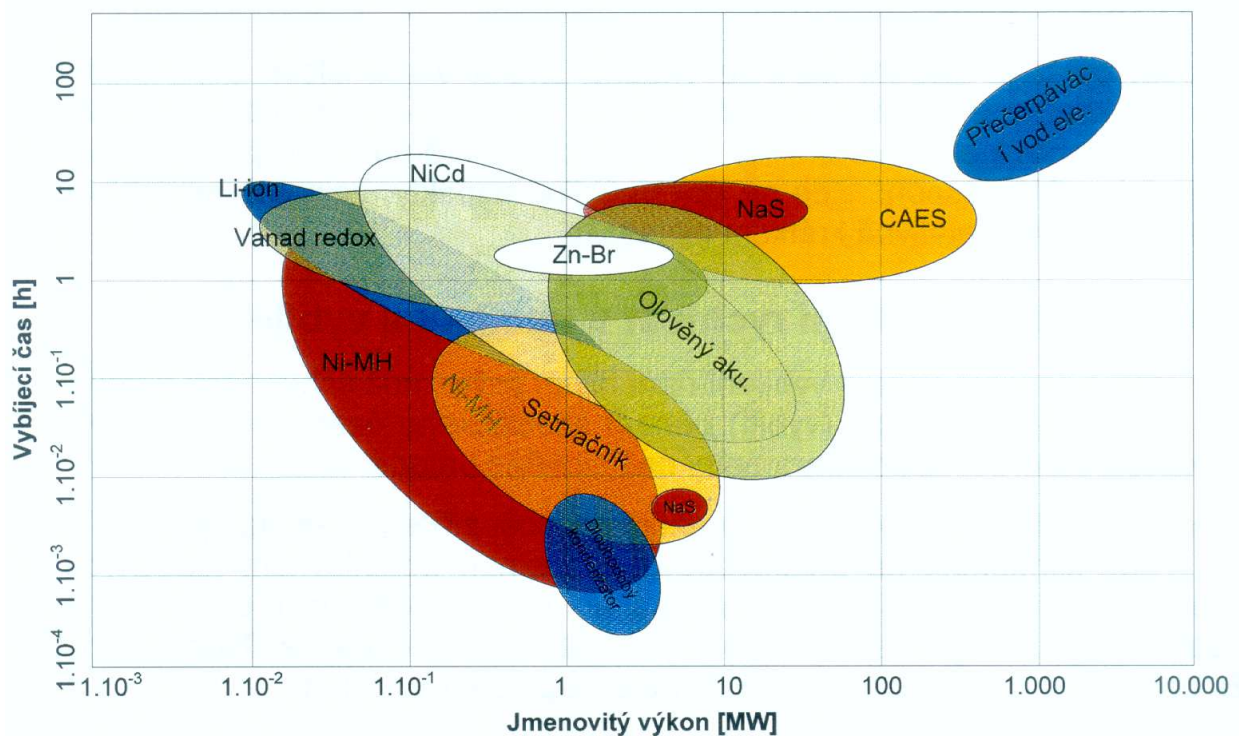
Na dalších obrázcích (Obr. 10.2 až 10.4) je znázorněno rozdělení akumulačních systémů z hlediska ekonomického, popřípadě z požadavků aplikace na konkrétní soustavu.



Obr. 10.2: Rozdělení systémů podle nákladů na jednotku energie [1]



Obr. 10.3: Životnost a účinnost akumulčních systémů [1]



Obr. 10.4: Výkonové požadavky na akumuláční soustavy [1]

## 10.3. Akumulační soustavy a jejich podrobnější popis

### 10.3.1 Požadovaný výkon

Potřeba dostatečného výkonu je dána aktuálním rozložením spotřeby elektrické energie a její výrobou při náhlých výpadcích velkých zdrojů. Pro tento případ je rozhodujícím členem právě požadovaný výkon a schopnost ho rychle poskytnout.

Okamžitým záložním výkonem se rozumí stav, kdy je potřeba elektrická rezerva do 5 minut. Ideální pro pokrytí touho požadavku jsou vhodné právě akumuláční systémy na principu setrvačníků nebo kondenzátorových baterií (pro menší výkony – řádově do desítek kW), nebo přečerpávací vodní elektrárny (pro větší výkony – řádově desítky až stovky MW).

Rychlé, popřípadě pomalé zálohy (časový úsek mezi 5 až 30 minutami a nad 30 minut) mohou převzít baterie, které jsou složitějších konstrukcí, a které budou popsány dále. U pomalých záloh je možno počítat už s nasazením elektráren, zejména na zemní plyn a studených záloh.

### 10.3.2 Akumulační kapacita

Akumulační schopnost neboli kapacita akumulátoru se udává obvykle jako náboj v ampérhodinách nebo jako akumuláční energie ve wathodinách. Je stejně důležitým pojmem

jako požadovaný výkon. Je to doslova schopnost (vlastnost) daného uspořádání nahromadit v sobě elektrické náboje. Někdy se jí také říká jímavost akumulátoru.

S kapacitou akumulátoru se budeme setkávat v textu velice často, protože dle této kapacity můžeme rozhodnout o vhodnosti pro konkrétní instalace. této kapacity můžeme rozhodnout o vhodnosti pro konkrétní instalace.

### 10.3.3 Počet cyklů

Počet cyklů je termín, který je vhodné zmínit v souvislosti s dlouhodobou akumulací, kde se předpokládá časté střídání režimů. Naopak pro akumulaci záložní (tzv. zálohové akumulátorovny v jaderných elektrárnách), je počet nabíjecích a vybíjecích cyklů zásadní. Zde se uplatňují jiné aspekty, zejména spolehlivost a dostatečný výkon v relativně krátkém okamžiku.

### 10.3.4 Rychlost a reakční rychlost u nabíjení a vybíjení

Rychlost nabíjení versus vybíjení není ničím jiným, než schopností baterie dosáhnout plné kapacity nabití (vybití) během specifického časového úseku. Kupříkladu kondenzátory mají jiné parametry než olověné baterie.

Dalším sledovaným údajem je reakční rychlost změny mezi nabíjením a vybíjením. Tedy schopnost se přizpůsobovat aktuálním požadavkům kladených na akumulátory. Údaje o rychlosti změny nabíjení nebo vybíjení jsou důležité pro obnovitelné zdroje energie, jejichž výroba je obtížně predikovatelná. Tato rychlost se může pohybovat od řádů desetin milisekund až po desítky minut.

### 10.3.5 Fáze přeměny

Fázi přeměny můžeme definovat pro homogenní a heterogenní systémy.

#### **Homogenní systémy:**

Homogenním systémem nazýváme systém, kde podoba je ukládání a odběr energie řešen shodným principem přeměny energie. Mluvíme-li o elektrické energii, potom za homogenní systém lze považovat uskladnění ve formě magnetického, nebo elektrostatického pole. V současné době na těchto principech pracují cívky (SMES), nebo kondenzátory (Super nebo ultra kapacitory).

#### **Heterogenní systémy:**

Heterogenním systémem můžeme nazývat systém, kde podoba ukládání a odběr energie je řešena odlišným principem (i částečným) přeměny energie. Tímto způsobem jsou řešeny všechny ostatní druhy akumulačních systémů (chemické vazby, mechanické, tepelné aj.).

## 10.3.6 Mechanické akumulční systémy

### Kinetická energie

#### *Setrvačníky (Flywheel)*

Setrvačník je historicky známé zařízení. Jeho přednosti jsou zejména v jednoduchosti a mnohostranném použití. Moderní setrvačníky dosahují běžně rychlosti otáčení přes 20.000 min<sup>-1</sup> (i přes 50.000 min<sup>-1</sup>). Samozřejmě je i použití magnetických ložisek. Rotor se točí ve sníženém tlaku okolního média (blíží se vakuu). Speciální konstrukční prvky snižují mechanické ztráty na minimum a zaručují vysokou účinnost [14].

Akumulační systémy se setrvačníky by mohly v budoucnu nahradit některé ze starších typů baterií, většinou založených na principu Ni-Cd. Vůči bateriím dosahují tyto systémy poměrně značných výhod, protože množství cyklů není omezeno chemickými pochody. Proto se životnost setrvačníků může pohybovat řádově v 10<sup>5</sup> cyklů, respektive několik let. Záleží pouze na předepsané údržbě (většinou se problém týká ložisek, má-li stroj nějaké a dále může docházet k únikům chladiva, popřípadě ztrátě vakua).

Těleso setrvačníku je tvořeno uhlíkovými vlákny, které mají velkou pevnost a při poruše se mohou snadno rozštěpit na malé úlomky s malou kinetickou energií. Účinnost setrvačníku je vysoká, dosahuje hodnoty přes 90%. Následně, jak uvádí literatura [5], jsou pro výpočet energetického potenciálu setrvačníků nutné následující aspekty.

Setrvačníky můžeme dělit na:

- ideální jednorozměrný setrvačník (obrázek 10.5),
- ideální dvojrozměrný nebo vícerozměrný setrvačník (obrázek 10.6).

a) Energie v jednorozměrném setrvačníku je dána rovnicí:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(r\omega)^2 = \frac{1}{2}mr^2\omega^2 \quad (10.1)$$

kde

$E$ ..... energie (J)

$m$ ..... hmotnost (kg)

$\omega$ .....úhlová rychlost (rads<sup>-1</sup>)

$v$  ..... rychlost (m.s<sup>-1</sup>)

$r$  .....poloměr (m)

Odstředivá síla:

$$F = mr\omega^2 \quad (10.2)$$

kde

$F$ ..... síla (N)



Důležitá veličina je též pnutí ve struně, která definuje bezpečnost a je:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10.3)$$

kde

$A$ ..... průřez (  $m^2$  )

$\sigma$ .....síla ( Pa )

b) Energie v dvojrozměrném setrvačnicku je dána:

Vycházíme z polárního momentu setrvačnosti:

$$J = \frac{1}{2} m r_0^2 = \frac{1}{2} \pi \rho r_0^4 \quad (10.4)$$

kde

$J$  ..... moment setrvačnosti (  $kg \cdot m^2$  )

$\rho$  ..... hustota (  $kg \cdot m^{-3}$  )

Potom:

$$E_{in} = \frac{1}{2} J \omega_{max}^2 \quad (10.5)$$

Energie setrvačnicku:

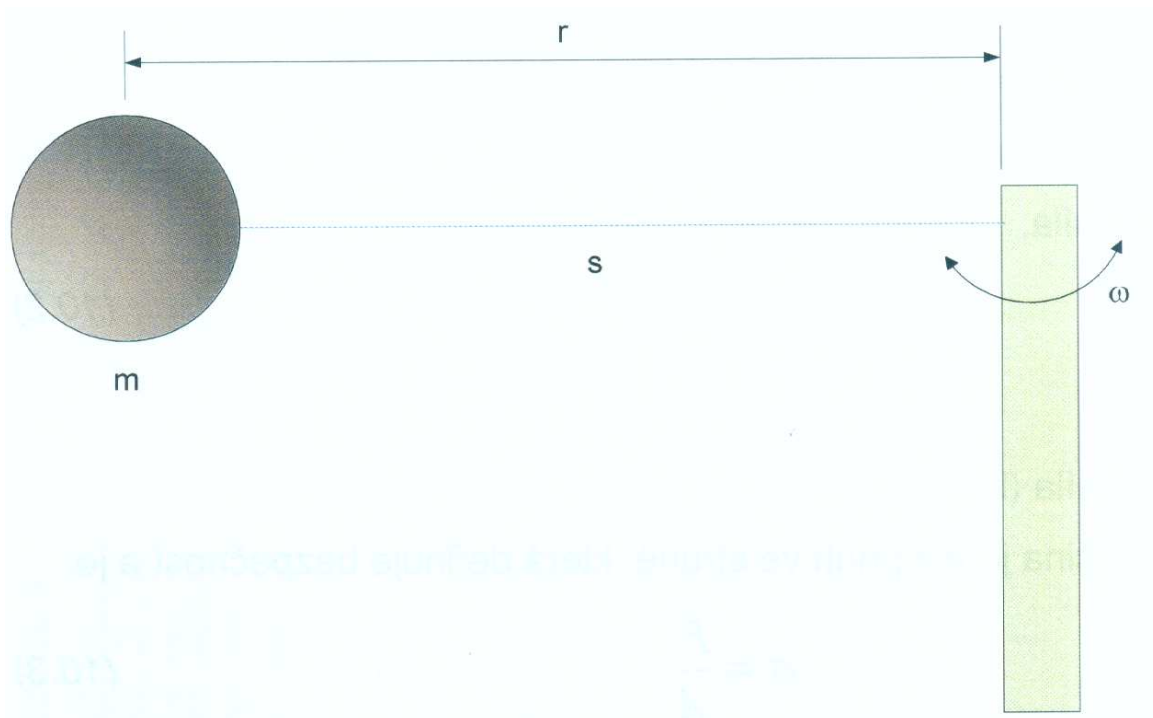
$$E_{out} = \frac{1}{2} J \omega_{max}^2 [ 1 - (1/k)^2 ] \quad (10.6)$$

kde

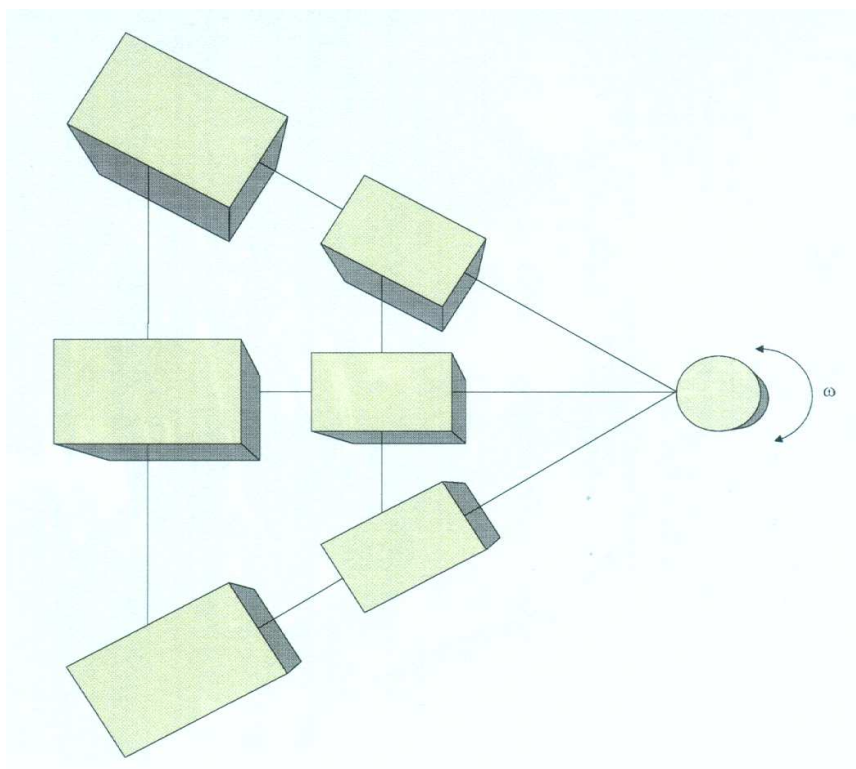
$k$ .....koeficient

Energie předaná do zátěže je:

$$E_{out} = \eta \frac{1}{2} J \omega_{max}^2 [ 1 - (1/k)^2 ] \quad (10.7)$$



**Obr. 10.5: Jednorozměrný setrvačnick**



**Obr. 10.6: Dvojměrný setrvačnick**

Hustota energie v setrvačnicku:

$$\frac{E}{m} = \frac{1}{4} (r_0 \omega_{\max})^2 [1 - (1/k)^2] \quad (10.8)$$

A pnutí v materiálu:

$$\sigma = \rho \frac{3+v}{8} (r_0 \omega)^2 \quad (10.9)$$

Na základě vlastností vyjádřenými vztahy 10.8 a 10.9 můžeme říci, že čím lehčí a pevnější materiál, tím vyšší hustota energie:

$$\frac{E}{m} \propto \frac{\sigma}{\rho} \quad (10.10)$$

Pro supravodivé magnety na ložiska se používají nejmodernější materiály, jak například texturované bloky  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ , které při teplotě 29 K dosahují magnetické indukce téměř 17 Tesla! Pro představu: nejlepší permanentní magnety mají magnetickou indukci  $B \approx 1,7T$ .

Setrvačníky můžeme rozdělit na [5]:

<i>Kompaktní kovové</i>	<i>Uhlíkové kompozitní</i>	<i>Power ring</i>	<i>Uhlíková vlákna</i>
<i>Pomaloběžné</i>		<i>Rychloběžné</i>	
<i>Klasická ložiska</i>	<i>Magnetická ložiska</i>		<i>Supravodivá ložiska</i>

**Tab. 10.1: Rozdělení setrvačnicků podle specifických vlastností**



**Obr. 10.7: Ukázka moderního setrvačnicku (Beacon Power)**

## Potenciální energie

### *Přečerpávací vodní elektrárny*

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) jsou všeobecně známé. V době dostatku energie čerpají vodu z níže položené nádrže do horní, aby v době nedostatku energie přes turbíny vodu vypustili zpět. Pro jejich další rozvoj máme omezené geografické podmínky. Jejich výstavba je drahá a pro okamžité potřeby nejsou vhodnými záskokovými zdroji energie.

Přečerpávací vodní elektrárny jsou jediným typem elektrárny, které pracují s akumulací vody, kterou si nejprve samy uloží. Mají většinou široký rozsah regulace, který je dán součtem výkonu a příkonu soustrojí:

$$P_{regul} = P_t + P_{\check{c}} \quad (10.11)$$

kde

$P_t$  ..... turbínový provoz

$P_{\check{c}}$  ..... čerpadlový provoz

U PVE je velice sledovaným údajem rychlost přechodu z čerpadlového do turbínového chodu, který je zpravidla do 5 minut u starších strojů se systémem čerpadlo-turbína v jednom, až do 1 minuty u moderních strojů. Nejlépe vycházejí soustrojí, která jsou vybavena nezávislými čerpadly a turbínami. Zde potom můžeme mluvit o okamžitých zálohách.

Pro ideální využití přečerpávací vodní elektrárny je nutné splnění několika podmínek:

- umístění, co nejbližší místa spotřeby,
- velký akumulační potenciál,
- co největší výškový rozdíl mezi nádržemi,
- ideální návrh soustrojí (má-li turbína být také čerpadlem, nebo čerpadlo má být zvlášť).

Účinnost PVE je dána součinem účinností jednotlivých částí elektrárny, které můžeme vyjádřit rovnicí (10.12) nebo graficky (Obr. 10.8):

$$\eta = \eta_{t\check{c}} \eta_{p\check{c}} \eta_m \eta_{\check{c}} \eta_{pt} \eta_t \eta_g \eta_{tt} \quad (10.12)$$

kde

$\eta_{tt}, \eta_{t\check{c}}$  ..... účinnost transformátoru v turbínovém a čerpadlovém provozu

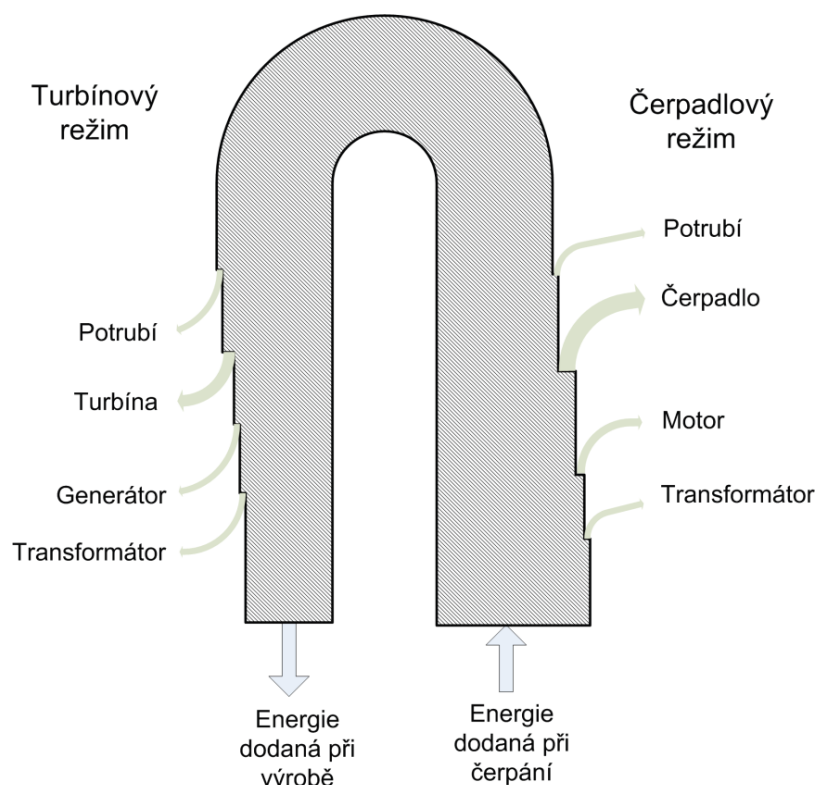
$\eta_m, \eta_g$  ..... účinnost motoru, generátoru

$\eta_{pt}, \eta_{p\check{c}}$  ..... účinnost potrubí turbíny a čerpadla

$\eta_t, \eta_{\check{c}}$  ..... účinnost turbíny, čerpadla

Vztah lze také přepsat do podoby:

$$\eta = \frac{E_t}{E_{\check{c}}} \quad (10.13)$$



**Obr. 10.8: Rozložení účinností v přečerpávací vodní elektrárně [11]**

Přečerpávací vodní elektrárny pracují ve čtyřech základních pracovních režimech:

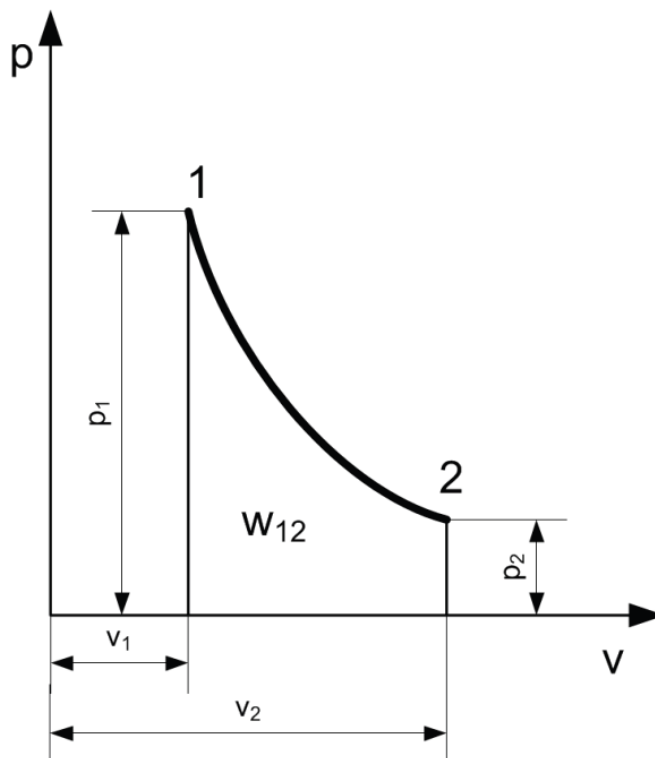
- klidový provoz,
- turbínový provoz,
- čerpadlový provoz,
- kompenzační provoz.

Výše uvedené vztahy platí pro tzv. malý cyklus, v kterém nejsou zahrnuty další ztráty, které s provozem PVE souvisejí (ztráty v přívodních vodičích apod.)

Účinnost starších bloků se pohybovala v rozmezí 50 – 70%. Nové zdroje (zejména nové strojové vybavení) dosahují lepších parametrů. Obvykle 80%.

### **Tlaková energie**

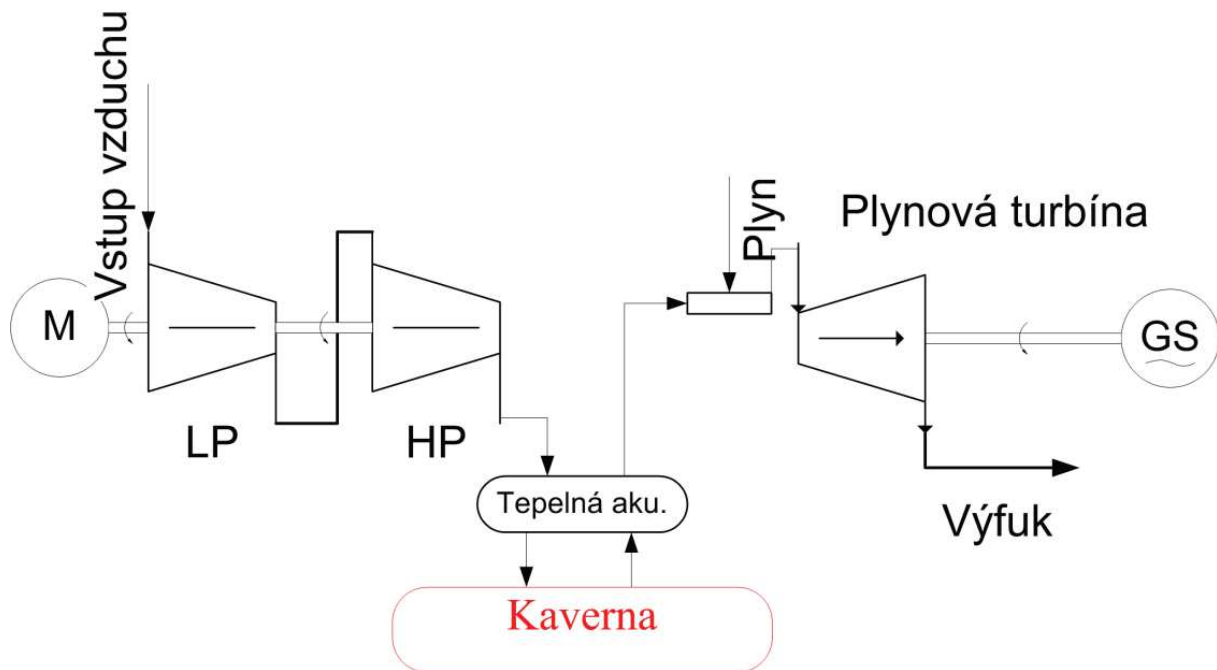
Akumulace energie prostřednictvím stlačeného vzduchu, obecně označována zkratkou CAES (Compressed Air Energy Storage), není příliš známá. Ani její vylepšená varianta AA-CAES (Adiabatic Advanced - Compressed Air Energy Storage) není příliš rozšířená, protože největšími problémy jsou adiabatická komprese a úspěšné začlenění systému do místních podmínek. Oba tyto systémy jsou příležitostí pro expanzi OZE. Účinnost systému je mezi (60 – 75) %. Tato metoda je podobná svým principem a rozsahem výše popsané technologii přečerpávacích vodních elektráren.



**Obr. 10.9: Adiabatická komprese v p-v digramu [13]**

Ve světě již běží úspěšné projekty (McIntosh, USA; Huntorf, Německo). Obě pracují se systémem, kdy je stlačený vzduch přiváděn do spalovací komory, je spalován se zemním plynem a díky tomu se zvýší entalpie fluida, které je následně hnáno do turbíny, kde dochází k vytvoření točivého momentu. Tlakovým vzduchem se dosahuje úspory energie k pohonu kompresoru.

Další zvýšení entalpie je možné docílit využitím geotermální energie. AA-CAES vychází z myšlenky adiabatického stlačování vzduchu. Toho nelze regulérně docílit, proto se uvažuje o akumulaci tepla při stlačování vzduchu. Tepla se využívá při zpětném odběru tlakového vzduchu. Zvýšená účinnost této koncepce je kompenzována vyššími investičními náklady a také problémem s objemným tepelným akumulátorem [3][13].



**Obr. 10.10: Schematický princip adiabatické komprese vzduchu [13]**

Rovnice vyjadřující měrnou práci při adiabatické kompresi [13]:

$$w_{12} = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa - 1} \right] = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right] \quad (10.14)$$

kde

- $w_{12}$  .....měrná objemová práce (J)
- $p$  .....měrný tlak (Pa)
- $v$  .....měrný objem (m<sup>3</sup>)
- $\kappa$  ..... izoentropický koeficient (-)

### 10.3.7 Elektrochemická přeměna – akumulace

Mezi elektrochemické akumulátory zařazujeme zejména průtokové baterie, palivové články a akumulátory.

Více o palivových člancích se lze dočíst v kapitole o vodíku. Palivový článek ale může pracovat i na metanol, popřípadě na methan, proto není dobré si spojit pojem palivový článek výhradně s použitím s vodíkem. Následující stať pojednává o bateriích všeho druhu.

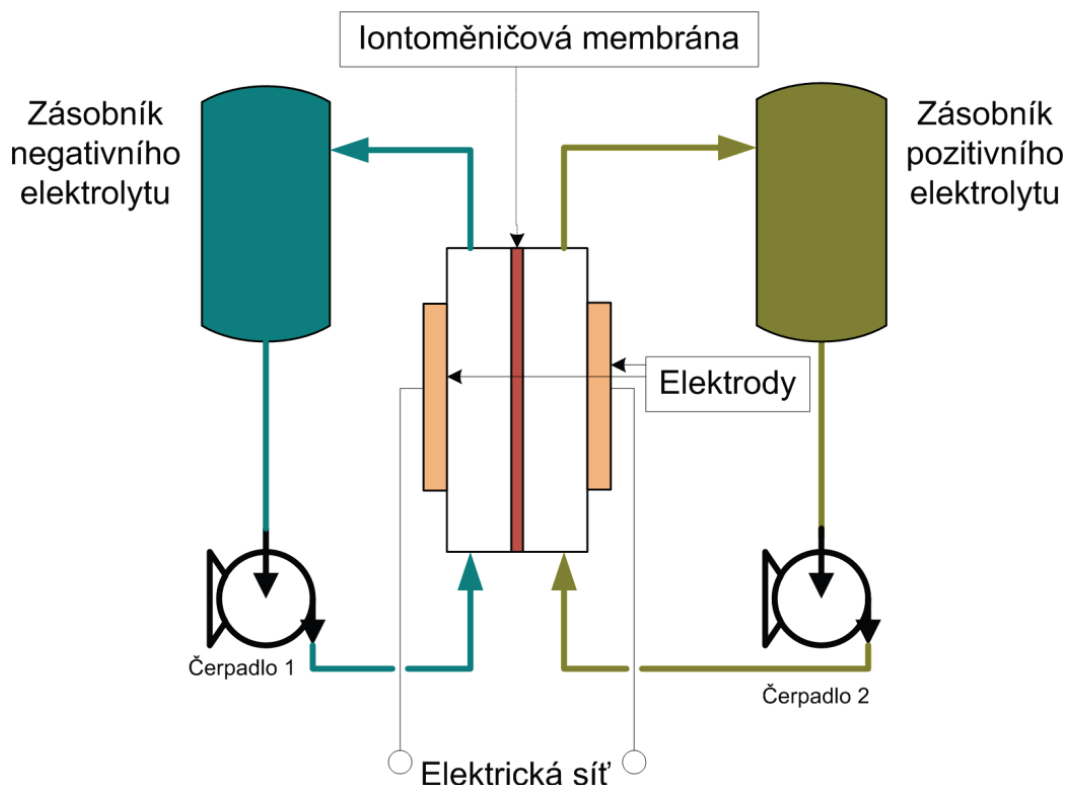
#### **Průtokové baterie**

Průtokové baterie jsou poměrně novou technologií. Jsou nabíjeny stejně jako konveční baterie, ale skladování je prostřednictvím tekutého elektrolytu. Tento elektrolyt je pomocí

čerpadel vháněn do zásobních tanků a z nich je zpět přiváděn do chemického článku, jak ukazuje obrázek 10.11.

V současnosti je několik typů průtokových baterií pracujících na principech:

- Elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB
- Uskladnění pomocí halogenu Br – ZnBr
- Na roztoku Polysulfid Bromidu (PSB, Br/S)
- CeZn (cér/zinek) – zatím ve vývoji



Obr. 10.11: Princip průtokové baterie

### ***Elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB***

Obecně se oxidace a redukce nazývá redoxovým systémem. Vanadiová redisová baterie disponuje ojedinělými funkcemi, které ji pasují do nejpravděpodobnějšího kandidáta na možnost akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Její ojedinělost spočívá především v neomezených počtech cyklů nabití a vybití, tudíž nedochází ke znehodnocování elektrolytu.

Obvykle udávaná životnost u baterií se pohybuje v řádech stovek až tisíců cyklů, kdy následně dochází k nevratnému poškození elektrod a je nutná opětovná výměna baterie. U redoxových baterií obecně tato výměna odpadá.

Z konstrukčního hlediska se jedná o průtokovou baterii, kde klíčovým problémem je těsnost ucpávek čerpadel použitých při čerpání elektrolytů. Iontoměničová membrána, která je jediným oddělovacím faktorem mezi dvěma elektrolyty, má životnost převyšující 15.000 cyklů. Tento aspekt značí velkou výhodnost baterie pro nasazení do celoročního provozu s nízkou mírou nutných odstávek pro údržbu systému.



Děj, který se uskutečňuje při nabíjení je popsán rovnicí 10.15.



Naopak rovnice při vybíjení je uvedena jako 10.16.



Při nabíjení dochází k iontové výměně mezi dvěma elektrolyty, proto je na oddělení dvou elektrolytů nutná iontovo-propustná polymerní membrána.

Akumulační kapacita je dána množstvím elektrolytu v zásobnících, přičemž prakticky dosažitelná objemová energetická hustota elektrolytu úplného nabíjecího (vybíjecího) cyklu je uváděna v rozsahu (15 až 25) kWh.m<sup>-3</sup> (ideálně dosažitelná hodnota činí (28 až 43) kWh.m<sup>-3</sup>). Měrná hmotnost VRB článku dosahuje 6,5 až 10 kg.kW<sup>-1</sup> u větších zařízení, u malých výkonů výrobce uvádí max. 12,5 kg.kW<sup>-1</sup>. Měrná hustota elektrolytu je přibližně 1,4, hmotnost elektrolytu představuje přibližně 90% hmotnosti celého zařízení.

V porovnání s klasickými akumulátory má elektrolyt v nabitěm stavu při cirkulaci ve VRB článku jen nepatrné samovybíjení. Pokud je nabitý elektrolyt uskladněn mimo článek, zůstává nabitý prakticky po neomezenou dobu [4].

Prostorová náročnost instalace souvisí především s akumulací kapacitou, přitom oddělené skladování elektrolytu od vlastní VRB, umožňuje snadné přizpůsobení instalace prostorovým podmínkám.

Jedná se o stavebnicový celek se základním modulem VRB 5 kW (v závislosti na výrobci). Pro nejčastější akumulaci kapacitu (doba cca 8 h) se uvádí, že 85 až 90% zastavěné plochy zabírají zásobníky elektrolytu, na vlastní články VRB a řídicí a kontrolní elektronika zbývající (15 až 10) %.

Je zjevné, že princip článku VRB je blízký funkci palivových článků, u kterých dochází k elektrochemické oxidaci paliva přiváděného do jedné z komor článku, do druhé komory se pak kontinuálně přivádí oxidant. Zásadní výhodou článku VRB je jeho reverzibilita, tj. v tomtéž elektrochemickém měničci může probíhat jak nabíjení, tak vybíjení podobně jako v klasických typech akumulátorů. Elektrické parametry článku VRB jsou rovněž blízké akumulátorovým nebo palivovým článkům. Rovnovážné napětí plně nabitěho článku VRB při provozní teplotě 25°C je VoC = 1,35 V. Podle stupně nabití se napětí změnou složení obou elektrolytů postupně mění, až u zcela vybitěho článku klesne na VoD = 1,0 V

Přechod z režimu nabíjení na vybíjení probíhá prakticky okamžitě (v časech řádu ms) v závislosti na polaritě rozdílu okamžitého rovnovážného napětí a napětí připojeného vnějšího elektrického obvodu.

Protože VRB zařízení je určeno především k dlouhodobé akumulaci elektrické energie, jsou pořizovací a provozní náklady uváděny v €/kWh. U zařízení řádu MWh se pořizovací náklady pohybují mezi 500 – 700 €/kWh, u 100 MWh systému činí okolo 450

€/kWh. Rozšíření akumulační kapacity (elektrolytu) u velkých zařízení přijde na cca 250 €/kWh. Provozní náklady se omezují jen na pravidelné roční kontroly stavu zařízení, provoz je automatický a programovatelný v systému řízení a kontroly. Při kontinuálním provozu je nutná výměna jediných pohyblivých částí – oběhových čerpadel elektrolytu po cca 5 až 7 letech. Náklady na údržbu a provoz jsou tak odhadovány na cca 0,008 €/kWh.

Svémi provozními parametry, zejména bezprostředním přechodem z režimu nabíjení na vybíjení jsou VRB akumulační jednotky optimální k vyrovnávání krátkodobých a střednědobých fluktuací výkonu větrných a fotovoltaických elektráren způsobených obtížně predikovatelným vývojem místních meteorologických podmínek. Tím se významně zvýší kvalita elektrické energie dodávané z tohoto typu zdrojů do elektrizační soustavy.

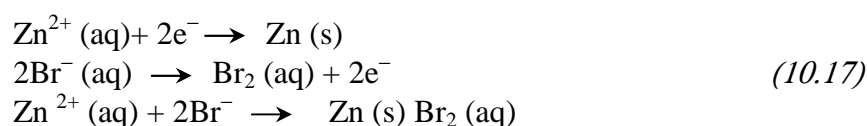
Vzhledem k minimálním provozním nákladům a zanedbatelnému samovybíjení v klidu lze zařízení využívat jako záložní zdroj s extrémně rychlým najeťím na plný výkon pro provozy vyžadující plné zabezpečení napájení elektrickou energií (letišť, nemocnice apod.).

Velkými VRB zařízeními je možno realizovat prakticky bez omezení nové akumulační kapacity elektrizační soustavy o výkonu řádu až 100 MW, případně lze využívat i distribuované VRB jednotky v držení drobných investorů prostřednictvím dálkového řízení jako významnou vedlejší systémovou službu pro operativní řízení ES nebo k nouzovému napájení při velkých poruchách v rozvodné síti.

### ***Uskladnění pomocí halogenu Br – Zubr***

Zinko-bromidová baterie obsahuje zinkovou negativní elektrodu a brómovou pozitivní elektrodu od sebe navzájem oddělených mikropropustnou membránou. Roztok zinku a soubor brómové sloučeniny cirkulují ve dvou oddílech. Tato baterie je založena na poněkud odlišném způsobu než PSB a VRB. V ZnBr slouží elektrody jako substrát pro reakci a jejich kapacita může být zmenšena, jestliže baterie není kompletně a regulérně vybita [9].

Během nabíjení je zinek elektricky pokovený na anodu a bróm je vázán na katodu. Reakce je popsána následující rovnicí:

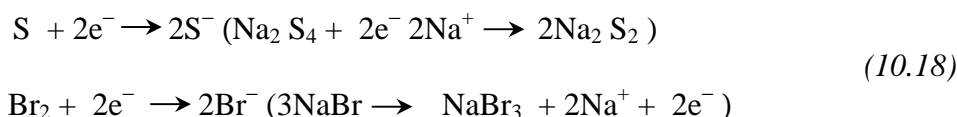


Během vybíjení je reakce opačná

### ***Polysulfidová Brómová baterie***

V tomto typu průtokové baterie jsou roztoky bromidu sodného (NaBr), sodíku (Na) a polysulfidu (Sn<sup>2-</sup>) použity jako elektrolyt. Kladné ionty sodíku přecházejí membránou během nabíjení nebo vybíjení. Jakmile bróm a síra jsou prvky, emitují a přijímají elektrony. Proto je tento systém nazýván spíše jako Br/S. [9]

Její princip popisuje rovnice:



Při vybíjení je reakce opačná.

Tato baterie se jeví jako perspektivní pro velké systémy jako mohou být akumulární centra v distribučních, či přenosových uzlech. Systém byl vyvíjen společností Regenesys technologies Ltd. Dostupné informace hovoří o aplikaci o výkonu až 12MW a kapacitě 120 MWh.

	<i>VRB</i>	<i>Bromid Zinku</i>	<i>PSB- Br/S</i>
<i>Jmenovitý výkon [MW]</i>	<3	<1	<15
<i>Jmenovitá kapacita [MWh]</i>	0,005 - 5	0,01 - 5	0 - 120
<i>Energetická hustota [Wh/l]</i>	16-33	60-90	20 - 30
<i>Životnost [roky]</i>	5-10	5-10	15
<i>Počet cyklů</i>	>12.000	>2.000	

**Tab. 10.2: Porovnání jednotlivých druhů průtokových baterií [2]**

### ZEBRA Baterie

Tato baterie má skutečné chemické složení NaNiCl, tedy sodík nikl chlorid. Výhoda této baterie je vyšší energetická hustota než např. u NiCd baterie. Její konstrukce je podobná baterii NaS, taktéž pracuje při vysokých teplotách. Modul baterie je schopný zvládnout až 2500 cyklů. Více informací o tomto typu baterie lze zjistit například v [9].

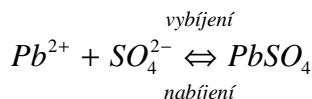
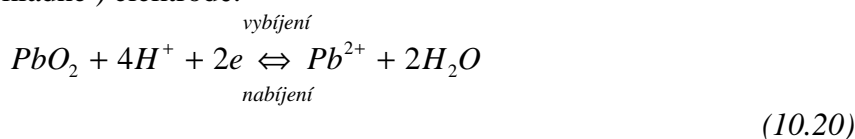
### Olověné baterie

Olověné baterie mají veliké postavení na našem trhu a napříč zeměmi. Slouží pro mnoho aplikací i zároveň pro energetickou akumulaci. Tyto baterie zaujímají celosvětově více než 45% vyráběných baterií. Olověný akumulátor se skládá z nádoby a ze dvou elektrod odlitých z čistého olova. Dále z vodného roztoku kyseliny sírové o hustotě 1,2 až 1,3 (podle druhu baterií). Kladné elektrody mají tvar mříží, které se plní pastou nebo jsou žebrované. Záporné elektrody jsou také mřížkované a pastované. Jedna deska je vyplněna oxidem olovičitým, druhá houbovitým olovem. Místo dvou desek se většinou používá více desek, které nejsou vzdáleny daleko od sebe. Jsou řazeny střídavě, desky stejného druhu jsou spojeny. Deska s oxidem olovičitým je hnědá, deska s houbovitým olovem je šedá.

Na negativní ( záporné ) elektrodě probíhá tato reakce [9]:

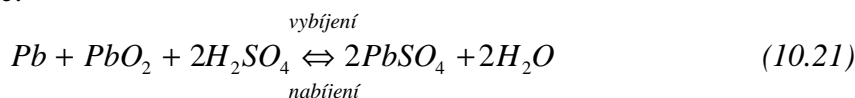


Na pozitivní ( kladné ) elektrodě:



Vznikající ionty  $\text{Pb}^{2+}$  se slučují s ionty kyseliny sírové na síran olovnatý  $\text{PbSO}_4$ , který je nerozpustný a zaujímá proto místo  $\text{PbO}_2$ .

Celková reakce:



Jak je vidět z předcházejícího textu, základní elektrodový proces na pozitivní a negativní elektrodě vyžadují slučovací a vylučovací mechanismus, nikoliv pevnou fázi iontových transportů. Nabíjecí - vybíjecí cykly jsou známé jako dvojité sulfatující reakce, je zobrazeno na obrázku 10.12.

Při vybíjení klesá koncentrace kyseliny sírové, protože se tvoří voda. Při nabíjení koncentrace opět stoupá. Nabití akumulátoru se dá tedy kontrolovat hustotou kyseliny. Jestliže nabíjení pokračuje i po nabití (veškerý síran je spotřebovaný), dochází na olovené elektrodě k tvorbě vodíku. Na desce s oxidem vzniká kyslík a baterie „vře“. K tomu je nutné zvýšené napětí svorkové napětí, což se dá také kontrolovat. Jestliže přebíjení trvá delší dobu (vyšší proud), nestačí se difusí doplňovat kyselina sírová kolem kladných desek, potom při vybíjení klesá napětí rychleji. Toto všechno jsou ztráty, se kterými musíme počítat [20].

Nominální napětí článků je 2 V, napětí je změřeno naprázdno, tedy při otevřeném obvodu.

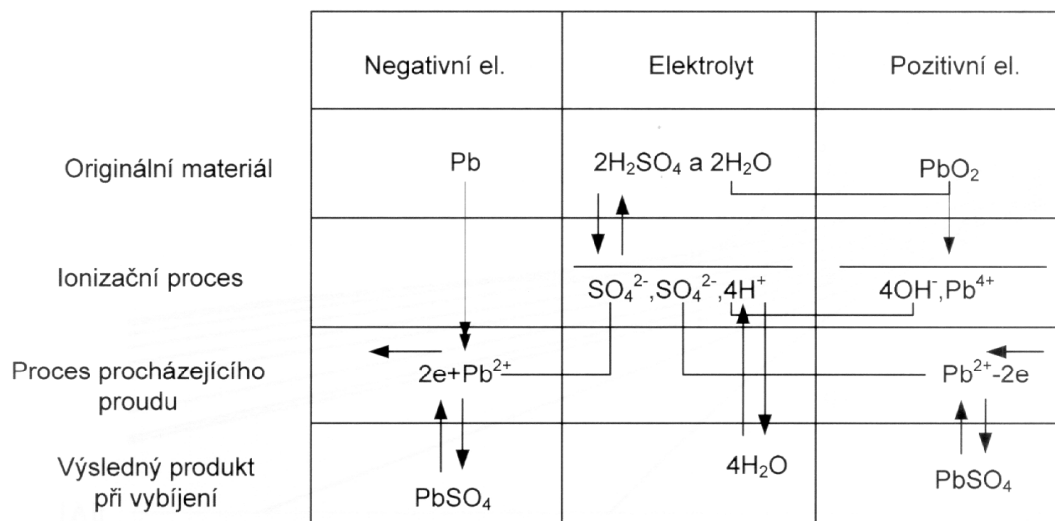
Maximální napětí nabitého článku může být až 2,125 V. Vybitý článek má hodnotu 1,75 V na článek, ale při hlubokém vybití může sahat až k hodnotě 1,0 V a to zejména při nízkých teplotách.

Na dalším obrázku (Obr. 10.13) je vidět skutečně změřená charakteristika a pomocí programu vytvořená Volt-ampérová charakteristika malého oloveného akumulátoru [9].

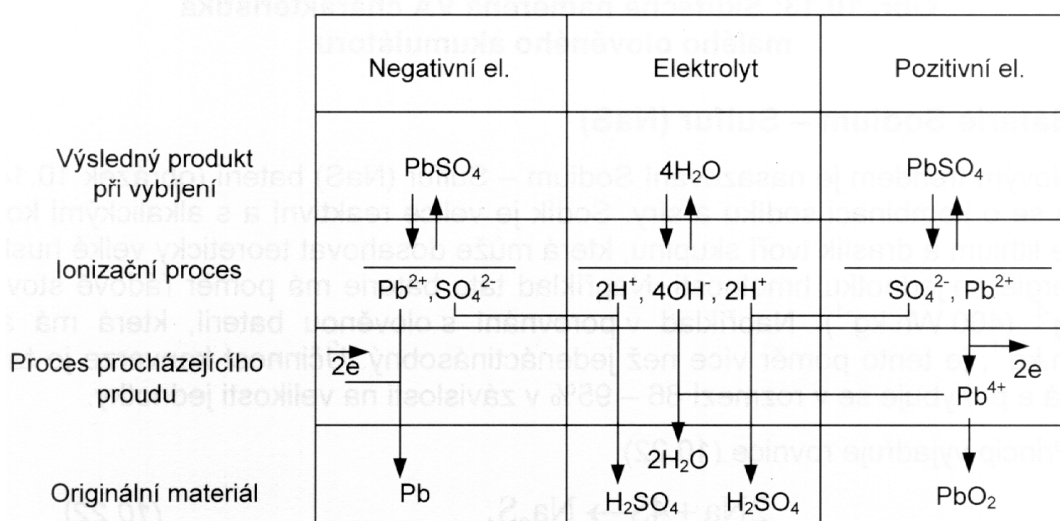
Hlavní nevýhodou těchto baterií je poměrně nízká hustota energie, dlouhá doba nabíjení, velká hmotnost (což pro stabilní zdroje, nebo pro zdroje vyrovnávací nevádí), která je tvořena především deskami, elektrolytem, konektory atd. Použitím uhlíkových vláken v kladných elektrodách se snížila hmotnost baterií a částečně se zvýšil výkon olovených článků.

Olovené baterie byly oblíbenou volbou pro trakční baterie, tak i pro záložní systémy s jednotkovými výkony až 1,5 MW a s počtem cyklů až 2000 (u nejmodernějších baterií).

Nejnovější typy jsou většinou bezúdržbové. tzn., že není nutné dolévat vodu. V normálním cyklu je při nabíjení na jedné elektrodě vylučován kyslík a a druhé vodík se kterým rekombinuje zpět na vodu. Dále mají ochranu proti vznikajícím plynům při přebíjení (tzv. baterie ventilové nebo baterie řízené ventilem, jenž brání případné nadlimitní tvorbě plynů jejich odpouštěním).



a)



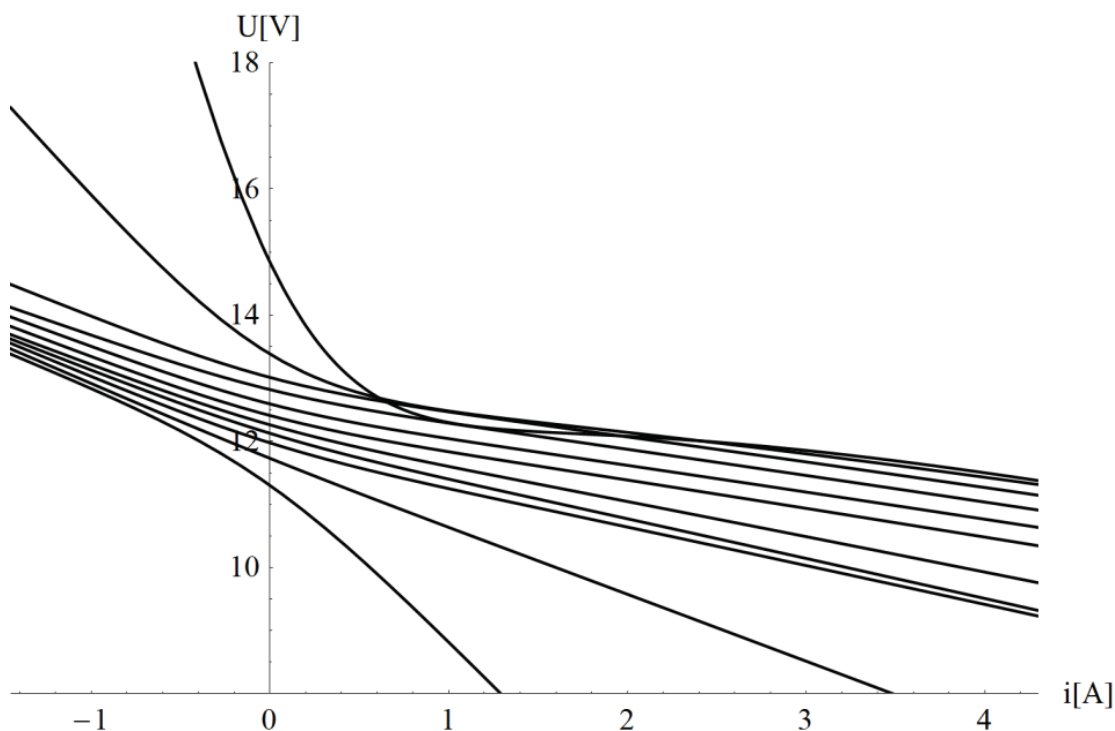
b)

**Obr. 10.12: Nabíjení a vybíjení olověných akumulátorů. Vybíjecí cyklus (a). Nabíjecí cyklus (b). [9]**

Dalším pokrokem je gelový elektrolyt. Jedná se o směs kyseliny sírové s malými částmi skelného prachu. Tato směs vytvoří vodivý elektrolytický gel, který spojuje výhody obou systémů.

Vývoj gelů vhodných pro akumulátory (nemusí se jednat pouze o olověné, ale také lithiové akumulátory, kde gelem může být např. směs litných nebo sodných příměsí) se nezastavil. Všeobecně jsou gelové akumulátory bezpečnější a pohodlnější pro obsluhu a údržbu.

Problematika olovených akumulátorů je velice obsažná. Více informací lze najít např. v [9].



**Obr. 10.13: Skutečně naměřená VA charakteristika malého oloveného akumulátoru**

### Baterie Sodium – Sulfur (NaS)

Novým trendem je nasazování Sodium – Sulfur (NaS) baterií (obrázek 10.14). Jedná se o kombinaci sodíku a síry. Sodík je velice reaktivní a s alkalickými kovy jako je lithium a draslík tvoří skupinu, která může dosahovat teoreticky velké hustoty energie na jednotku hmotnosti. Například tato baterie má poměr řádově stovky  $\text{Wh.kg}^{-1}$  ( $400 \text{ Wh.kg}^{-1}$ ). Například v porovnání s olovenou baterií, která má asi  $30 \text{ Wh.kg}^{-1}$ , je tento poměr více než jedenáctinásobný. Účinnost konverze je také vysoká a pohybuje se v rozmezí 86 – 95% v závislosti na velikosti jednotky.

Princip vyjadřuje rovnice (10.22):

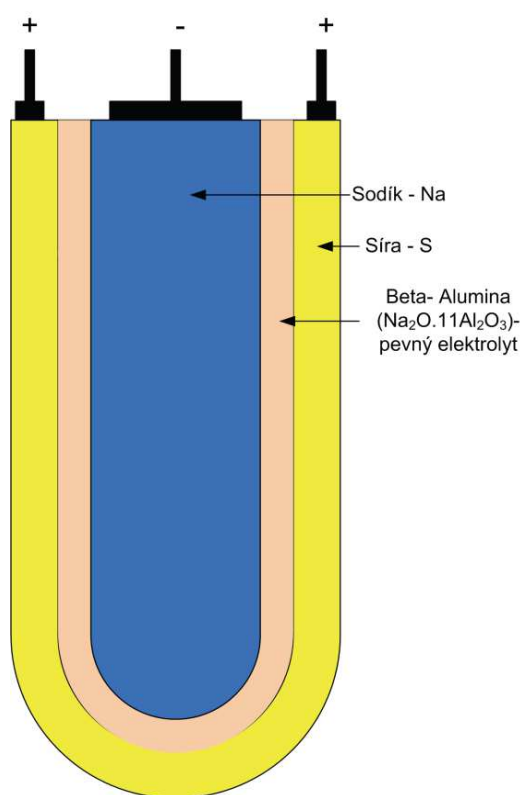


Tyto akumulátory zabírají menší, přibližně 3x, prostor jak olovené akumulátory. Je možné je snadno zapojovat do různých kombinací a tím určovat výstupní výkon i celkovou akumulovanou energii. Vyhovují požadavkům pro špičkové odběry, tedy možnost jejich vysokého krátkodobého přetížení. Umožňují také velmi rychlé dobíjení. Nedochozí u nich k samovybíjení ani paměťovému efektu. Svým provozem neznečišťují životní prostředí, nevypouštějí do svého okolí žádné znečišťující látky, nezpůsobují hluk, ani vibrace. Nicméně tyto akumulátory jsou vyrobeny z levných materiálů a jsou převážně určeny pro trvalý provoz

nabíjení/vybíjení. Nevýhodou zůstává nemožnost transportu nebo provozu s vibracemi kvůli vnitřním roztaveným složkám, které musejí během provozu zůstat v klidu.

Jednotlivé články akumulátoru produkují napětí stejné jako olověné akumulátory, okolo 2 V.

Kompletují se do velkých celozapouzdřených modulů s uvnitř vyčerpaným vzduchem – vakuem nebo argonem pro nižší tepelné ztráty. Akumulační systémy a akumulční centrály jsou používány převážně v Japonsku, kde na zhruba 30-ti místech dokážou dodávat 20 MW po dobu 8 hodin. V USA je jejich používání teprve na začátku. Vyznačují se také značnou přetížitelností, je zde umožněn špičkový odběr až 6ti násobku normalizovaného výkonu po dobu minimálně 30 sekund. Elektrická efektivnost těchto akumulátorů je mezi 80% až 90%. Životnost delší než 15 let z nich dělá spolu s nízkými náklady na jejich výrobu jednu z nejvhodnějších dnes používaných řešení pro akumulční systémy. [8]



**Obr. 10.14: Sodíková baterie [18]**

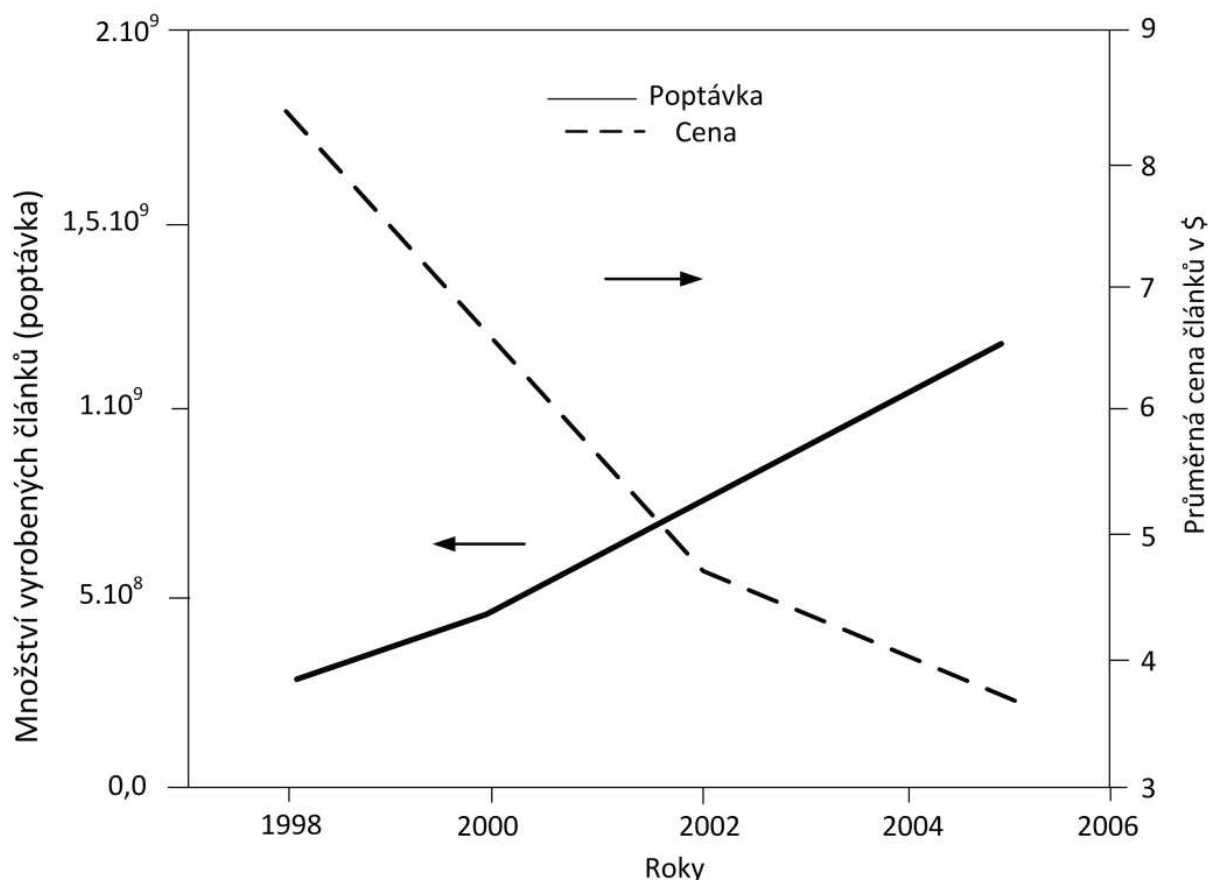
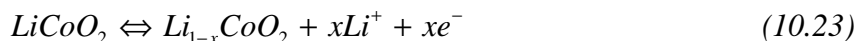
Články jsou usazeny do hermeticky uzavřených obalů, které musejí odolávat vysokým provozním teplotám a tlakům. Katoda je tvořena roztavenou sírou a anoda roztaveným sodíkem. Sodík má teplotu tání okolo 80°C a síra okolo 120°C, tudíž pro započatí reakce stačí dosáhnout teploty jen o trochu vyšší než teplota tání síry, ale ve snaze dosáhnout co největšího výkonu a bezztrátového provozu se teplota pevná struktura z keramiky s přídavkem hliníku a oxidu hlinitého.

Během vybíjení se ze sodíkové anody uvolní do vnější proudové smyčky elektrony, reakcí na to v roztavené anodě vzniká sodíkový iont  $\text{Na}^+$ , který se dostane skrz pevný elektrolyt až do síry, kde se díky němu vytvoří kladný náboj – kladná elektroda, která po

uzavření proudové smyčky přijme elektron. Tento děj je vratný, tudíž tím samým způsobem, ale opačně dochází k nabíjení. [8]

### Lithiové baterie

Lithium je světlý a velmi reaktivní kov. Tím se stává velmi atraktivní pro energetickou akumulaci. Stejně jako předchozí druh baterií založených na sodíku. Anoda konvenčních článků je vyrobena z uhlíku, katoda z oxidu kovů a elektrolyt je lithiová sůl v organických rozpouštědlech. Níže uvedená rovnice vyjadřuje elektrochemickou reakci:



Obr. 10.15: Závislost ceny a poptávky [9]

Další vývoj je zaměřen na technologie LiFePo, Li-air a další technologie, které budou levnější, i když za cenu menší kapacity. S nasazením lithiových baterií se nicméně uvažuje pouze v bezvýpadkových záložních zařízeních – Uninterruptible Power Supply (UPS). [6]

Co se týče akumulátorů a z nich sestavených akumulačních systému na bázi lithia, přicházejí v úvahu dnes již vcelku běžné dvě varianty Li-ion a Li-pol. Hlavní předností je díky velmi lehkému lithiu velmi malá hmotnost na instalovanou kWh. Zůstává také bezúdržbový provoz a je u nich možné uložit větší množství energie na jednotku obsahu oproti předchozím typům. Problém samovybíjení je takřka odstraněn a samotné články je možné skoro úplně vybit bez ztráty. Praktická realizace akumulačních systémů následně



kapacity nebo snížení životnosti. Je umožněno rychlé nabíjení i vybíjení, tudíž jsou vhodné pro dynamické akumulční systémy. I se svojí dlouhou životností jsou srovnatelné s předchozími typy. Z pohledu zatížení životního prostředí jsou, jak výrobou, tak následnou recyklací, daleko více ohleduplnější. Bohužel i přes stále nové a efektivnější technologie výroby je pořizovací cena těchto akumulátorů a akumulčních systémů z nich sestavených neúměrně vysoká, tudíž jejich použití je v dnešní době takřka vyloučené. Pravděpodobně se pořizovací ceny v následujících letech značně sníží a tyto akumulátory bude možné použít jak centralizovaně, tak decentralizovaně přímo v jednotlivých gondolách větrných elektráren díky jejich velmi nízké hmotnosti. [8]

U Li-ion a Li-pol článků je řešení spojování za účelem zvýšení výstupního napětí a výkonu obdobné s tím rozdílem, že napětí jednotlivých článků je u Li-ion akumulátorů okolo 3 V a u Li-pol se pohybuje od 1,8 do 3,3 V podle použití elektrolytu a katody. Tyto akumulátory mají vysokou životnost, až 3000 nabíjecích cyklů, se skoro bezztrátovou efektivitou nabíjení.

Vnitřní struktura u Li-ion článků je podobná NiCd článkům. Rozdíl je v použití elektrod, katoda je Praktická realizace akumulčních systémů je tvořena oxidem lithia a jiného kovu, většinou  $\text{LiNiO}_2$ ,  $\text{LiCoO}_2$  nebo  $\text{LiMoO}_2$ . Vhodnost použití jednotlivých materiálů pro elektrody katod jsou současně ve výzkumu. Anoda je tvořena porézním uhlíkem a elektrolyt je vyroben z lithiových solí například  $\text{LiPF}_6$ , rozpuštěných v organických karbonátech Princip činnosti nabíjení je založen na vytvoření iontu z atomu lithia na katodě, který nadále putuje přes elektrolyt a separátor až k uhlíkové anodě, kde se spojuje s externím elektronem a podílí se na uzavření proudové smyčky nabíjecího okruhu. Proces vybíjení je založen na stejném, ale opačném principu. [8]

## **NiCd akumulátory**

Nabíjecí cyklus u NiCd článků spočívá ve vytvoření vrstvy oxidu nikelnatého na niklové katodě a zvýšení koncentrace odvodněním elektrolytu, většinou z hydroxidu draselného. Proces vybíjení je charakteristické řidnutím hydroxidového elektrolytu a usazováním niklu na niklové katodě. U těchto akumulátorů je třeba hlídat přebíjení, protože se při chemických reakcích tohoto procesu vylučuje hodně vody do elektrolytu a následně dochází buď k poškození pohlcovače vlhkosti nebo rychlému snižování životnosti. [8]

Příkladem použití může být oblastní akumulční stanice ve Fairbanks, Alaska, USA, kde je instalovaný výkon 40 MW v NiCd článkách. Konstrukce průmyslově vyráběných NiCd článků se stejně jako u olověných článků provádí jak do plastových, tak do kovových, hermeticky uzavřených nádob. Katoda je tvořena niklovou elektrodou a anoda kadmiovou, u prvních akumulátorů železnou elektrodou. Dále je akumulátor tvořen vrstvou elektrolytu se separátorem a vratným pohlcovačem vlhkosti. Elektrolyt je ve většině akumulátorů tvořen jednoduchým hydroxidem alkalického prvku, většinou hydroxidem draselným KOH nebo hydroxidem sodným NaOH. [8]

## 10.3.8 Chemická akumulace

### Vodík

#### *Palivový článek založený na vodíko-kyslíkové konverzi*

Na úvod je důležité znovu upozornit, že vodík není palivem, nýbrž pouze nosičem energie. O tomto systému se velice často hovoří v souvislosti s budoucí dopravou, ale i energetikou. Účinnost zpětné konverze na elektrickou energii je ale velice nízká – okolo 30%. Záleží na použití elektrolyzérů a palivových článků. V dnešní době je použití vodíkového hospodářství problematické. Níže následuje krátký výčet akumulčních vlastností a problémů, které s tím souvisí.

Soustava může mít tři základní aplikace:

- a) Produkce medicínálních plynů
- b) Produkce vodíku a kyslíku, jejich akumulaci a následné energetické využití
- c) Využití v chemickém a potravinářském průmyslu

#### *Vodík a kyslík jako chemické prvky*

Vodík je bezbarvý plyn bez zápachu, hustota je 0,0899 g/l (lehčí než vzduch), teplota varu je 20,37 K. Výbušný se vzduchem.

Kyslík je bezbarvý plyn bez zápachu. Hustota 1,429 g/l (těžší než vzduch), teplota varu je 90,15 K. Ve spojení s organickými materiály může vyvolat hoření nebo výbuch.

#### *Výroba vodíku*

V předešlých úvahách jsme předpokládali výrobu vodíku pomocí elektrolýzy. Elektrolýza je proces, ve kterém se vodík uvolňuje na katodě a na kyslík na anodě. Tato reakce je náročná čistotu vody a elektrickou energii. Pro zvýšení vodivosti vody se používá roztoku nejčastěji KOH.

Jestliže přesto budeme přemýšlet o aplikaci vodíku jako akumulčního média, nesmíme opomenout HTR (vysokoteplotní) reaktory (stále ve vývoji). K rozkladu vody se používá vysoké teploty a pomocí chemicko-technologických prostředků je dosaženo lepší bilance.

#### *Problémy v akumulaci vodíku*

Skladovat vodík ve velkých objemech není dosud stále dostatečně vyřešené. Atomy vodíku jsou velice lehké i malé a unikají skrze krystalové mřížky různých kovů nebo jejich slitin.

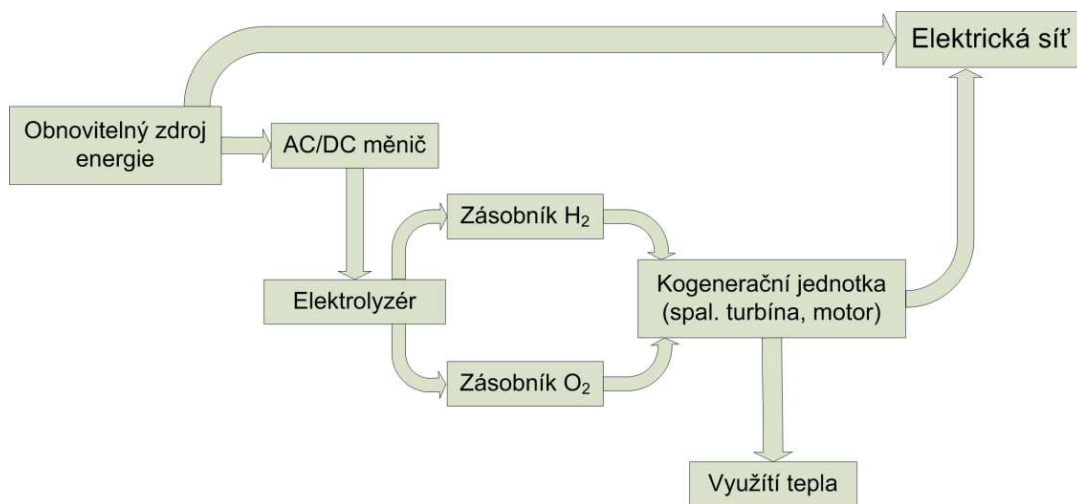
Principiálně můžeme vodík skladovat ve třech fázích:

- v plynné fázi
- v kapalně fázi
- s pomocí metal-hydridových zásobníků, kdy se plyn naváže na krystalovou strukturu slitiny

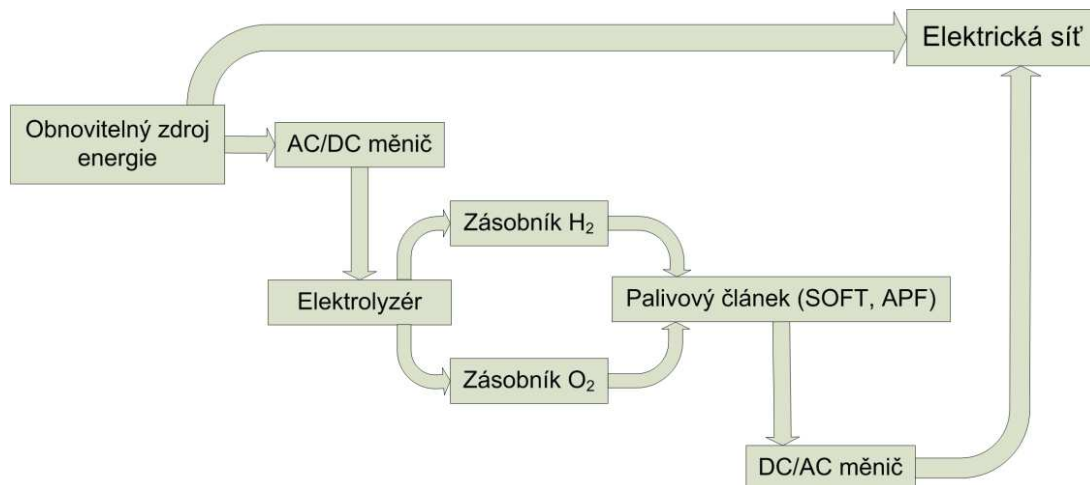
## Výhody systému

Celá soustava obsahuje minimální množství rotujících částí, které mohou být příčinou poruch a problémů. Palivové články jsou velice závislé na čistotě vstupujících médií. Na druhou stranu je ekologicky přívětivý – bezemisní. Neprodukuje také hluk s výjimkou kompresorů apod. Na níže uvedených obrázcích můžeme vidět základní systém akumulace elektrické energie prostřednictvím vodíku.

Více informací o vodíkových technologiích je uvedeno v kapitole 8. *Palivové články a jejich hospodářství.*



**Obr. 10.16: Schéma akumulace prostřednictvím vodíku**



**Obr. 10.17: Schéma akumulace a spolupráce OZE s elektrickou sítí.**

## Biopaliva

Biopalivem jsou chápány cíleně pěstované rostliny, které mohou být následně využity energeticky. Pro potřebný vývoj rostlinstva může být udržováno vhodné klima ve sklenících,

kde se rychle může flóra rozvíjet. Následné využití (většinou termické zpracování) je chápáno jako jistý způsob zachování energie. Nutnou podmínkou je zabezpečit fotosyntézu.

### Syntetické (syntézní) kapaliny a plyny

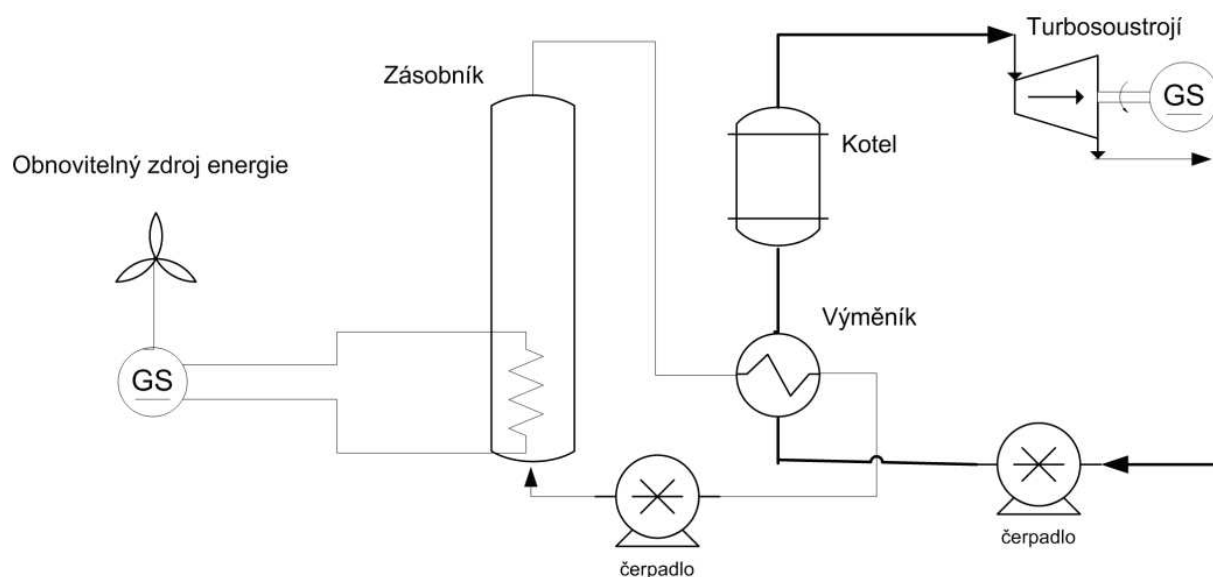
Syntézním plynům je přikládán velký důraz. Je známo, že pomocí elektrické energie lze z  $\text{CO}_2$  a vody udělat metanol. Další výroba syntetických plynů probíhá především parním reformingem z uhlí.

Syntézní plyny a jejich problematika vysoce překračuje možnosti této kapitoly. Jedná se o oblast velice zajímavou a v budoucnu jistě využitelnou.

### 10.3.9 Tepelná akumulace

#### Metoda Ritus

Metoda Ritus je založena na termální akumulaci elektrické energie prostřednictvím teplé vody. Ta je posléze přes regenerační oběh kondenzované vody z turbíny zpět využita. Tento systém se vyznačuje vysokou mírou efektivity a akumulací kapacity. [12]



Obr. 10.18: Principiální schéma [12]

#### Látky se změnou skupenství

Látky se změnou skupenství jsou vynikající pro akumulaci tepelné energie pouze v rozsahu jejich vlastních teplot tání. Pokud bychom potřebovali akumulaci schopnost vyšší než je jejich bod tání, vyplatí se akumulace do současných materiálů. Velice dobře se uplatňují různé parafíny a vosky. Jejich teploty tání jsou blízké teplotě varu vody.

Eutektické slitiny jsou slitiny materiálů, které při tuhnutí vytvářejí krystaly. Teplota tání dvou kovů by měla být pokud možno co nejbližší. Důležitou vlastností je tzv. eutektická teplota, což je teplota nižší než teplota tání každé ze složek. Při tuhnutí se latentní teplo odevzdává, takže teplota zůstává po nějaký čas stejná. Až poté začne teplota slitiny klesat.

Tyto látky ale z pohledu energetiky (zvláště elektroenergetiky) nemají příliš velký význam.

### **Přírodní látky**

Přírodní látky pro uchovávání tepelné energie jsou například, kámen, cihla apod. Samozřejmostí je voda. Z umělých látek můžeme jmenovat například beton.

### **10.3.10 Elektrická akumulace**

Z hlediska akumulace je elektrická akumulace nejlepším řešením. Současné možnosti jsou však omezené.

#### **Superconducting magnetic energy storage (SMES)**

Superconducting magnetic energy storage je systém, který ukládá energii do magnetického pole. Jedná se o relativně nový systém, který je stále ve výzkumu a vývoji. Malé demonstrační jednotky existují, ale problematická se jeví akumulace vyššího množství energie (nad 1MWh) [16].

#### **Superkapacitory**

Superkondenzátory představují nový velkoobjemový systém akumulace energie. Kondenzátory mají velkou hustotu energie řádově 10 Wh/kg, delší životnost než konvenční baterie a také vyšší účinnost až 95%. Další předností jsou zejména vysoké krátkodobé dodávky výkonu, kdy je možné dosáhnout proudu až 4500 A. V anglické terminologii mají zkratku – SCESS – Super Capacitor Energy Storage System [19]. Obstál při několika milionech cyklů nabití-vybití. Doba nabíjení i vybití je extrémně krátká a účinnost lepší než 95 %.

Rovnice jejich energetické bilance je:

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (10.24)$$

kde

U.....napětí (V)

C... ..... kapacita (F)

Základní myšlenkou superakapacitoru je a byl vývoj optimálních zásobníků s kapacitou baterií, ale s operativními vlastnostmi kondenzátorů. Kondenzátory a to jak super nebo ultra mohou být aplikovány na zařízení, kde se předpokládá mnohem více nabíjecích a vybíjecích cyklů než by umožňovali baterie (více než 100.000 cyklů je možných). Energetická hustota je okolo 1-10 Wh.kg-1 a specifická hustota energie je 1,6 kWh.kg-1 a je vyšší než u baterií (s výjimkou Li-ionových baterií).

Superkondenzátor se skládá z kladné a záporné elektrody z hliníkové fólie, dvou vrstev aktivního uhlíku a mezi nimi se nachází separátor. V nenabitém stavu jsou částice s nenulovým nábojem (ionty) rovnoměrně rozloženy ve vodivé tekutině, tekutém nebo gelovém elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a naopak kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří omezeno hodnotou disociačního napětí. Průrazné napětí

elektrické dvouvrstvy je velmi nízké a tak typické provozní napětí superkondenzátorové buňky nepřesahuje 2,3 V.

Mezi jejich největší výhody patří

- Nízký vnitřní odpor a tím tedy vysoká účinnost (95% a více) a velmi malé ztráty
- Vysoká efektivita při nabíjení
- Možnost velmi častého nabíjení a vybíjení (mnoho cyklů)

Nevýhody:

- Množství energie uložené na jednotku váhy je nižší než u elektrochemických článků ( $3-5 \text{ Wh.kg}^{-1}$  pro superkondenzátory v porovnání s  $30-40 \text{ Wh.kg}^{-1}$  pro klasické baterie).
- Napětí se mění v závislosti na množství uložené energie (podobně jako u kondenzátorů).
- Mají nejvyšší dielektrickou absorpci ze všech typů

I přes nevýhody lze říci, že superkondenzátory mají budoucnost. Vyplňují totiž místo mezi klasickými kondenzátory a nabíjecími akumulátory. Mají malou kapacitu, ale naopak akumulátory mají pomalé nabíjení, limitované zatížení a krátkou životnost. A proto se budou superkondenzátory využívat nejpravděpodobněji ke krátkodobému zálohování zdrojů při krátkých výpadcích napájení, vyrovnávání a akumulaci el. energie pro malé větrné a solární elektrárny, hybridní automobily a napájení nízko příkonové kapesní elektroniky.

Nejnovější použití superkondenzátorů je ve startovacích bateriích lokomotiv a v moderních hybridních vozidlech.

## 10.4. Závěrečné hodnocení akumulátorových systémů

Na závěr hodnocení baterií je přehledová tabulka, která udává hlavní výhody a nevýhody jednotlivých systémů a akumulátorových baterií.

Technologie	počet cyklů	konfigurace	Specifická energie (Wh.kg <sup>-1</sup> )	Energetická hustota (Wh.l <sup>-1</sup> )	Specifický výkon (W.kg <sup>-1</sup> )
Olověno-kyselinové	800	článek	35	80	200
Nikl-kadmiové	1000	článek	35	80	260
Nikl-metalhydrid	900	článek	65	220	850
Nikl-železo	1000	článek	30	60	100
Nikl-vodík	2000	článek	55	60	100
Zinek/oxid stříbra	40-50	článek	90	180	500
Zinek/bromid	1250	baterie	65	60	90
Zinek/vzduch	n/a	baterie	150	160	95
Regenesys (PSB, Zn/Br)	2000	baterie	20	20	--
Vanad Redox	3000	baterie	10	10	--
Sodíko-sírové (NaS)	1500	článek	170	345	250
	1000	baterie	115	170	240
Li-C/LiCoO <sub>2</sub>	600	článek	155	410	--
Li-C/LiNi <sub>1-x</sub> Co <sub>x</sub> O <sub>2</sub>	400	článek	150	400	--
Li-C/LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (polymerní elektrolyt)	600	článek	140	300	--
Li/MnO <sub>2</sub> (tekutý elektrolyt)	300	článek	120	265	--

Tab. 10.3a Srovnání baterií [9]

Technologie	Aplikace	Výhody/ nevýhody
Olověno-kyselinové	Elektrické/hybridní automobily, malé zásobníky pro domácnosti	Komerčně dostupné, bezúdržbové /nízká specifická energie
Nikl-kadmiové	Elektrické/hybridní automobily, vesmírné aplikace, domácnosti	Komerčně dostupné /relativně vyšší cena, nízká energie
Nikl-metalhydrid	Elektrické/hybridní automobily, vesmírné aplikace, domácnosti	Vysoká specifická energie /relativně drahé
Nikl-železo	Průmyslové	Komerčně dostupné /velká údržba, možnost tvorby vodíku
Nikl-vodík	Armáda, vesmírné tech.	Dlouhá životnost /velice drahé, vysoké samovybití
Zinek/oxid stříbra	Armáda, vesmírné tech.	Vysoká specifická energie a výkon /Vysoká cena, velice krátká životnost
Zinek/bromid	--	Nízká cena /nízká energetická hustota
Zinek/vzduch	Průmyslové	Specifická energie /krátká životnost, nízký specifický výkon
Regenesys (PSB, Zn/Br)	Energetický zásobník	Velice velká velikost
Vanad Redox	Energetický zásobník	Velice velká velikost
Sodíko-sírové (NaS)	Energetický zásobník	Vysoká specifická energie a energetická hustota / vysoká teplota
	--	Vysoká specifická energie a energetická hustota / vysoká teplota
Li-C/LiCoO <sub>2</sub>	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie / cena
Li-C/LiNi <sub>1-x</sub> Co <sub>x</sub> O <sub>2</sub>	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie
Li-C/LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (polymerní elektrolyt)	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie /vyšší cena
Li/MnO <sub>2</sub> (tekutý elektrolyt)	Domácnosti	Vysoká specifická energie /nutný další vývoj

**Tab. 10.3b Srovnání baterií [9]**



Technologie	Napětí naprázdno (V)	Napětí v uzavřeném obvodu (V)	Teoretická specifická kapacita ( $Ah.kg^{-1}$ )	Teoretická specifická energie ( $Wh.kg^{-1}$ )	Rozsah teplot ( $^{\circ}C$ )	Doba zno-vunabití (h)	Samovybití při $20^{\circ}C$ (%/měsíc)
Olověno-kyselinové	2,1	1,98	120	252	-20 - +50	8-24	3
Nikl-kadmiové	1,35	1,2	181	244	-40 - +60	1-16	10
Nikl-metalhydrid	1,35	1,2	178	240	-30 - +65	1-2	30
Nikl-železo	1,4	1,2	224	314	-10 - +60	5	25
Nikl-vodík	1,5	1,2	178	240	-10 - +30	1-24	60
Nikl-Zinek	1,73	1,6	215	372	-20 - +50	8	15
Zinek/oxid stříbra	1,85	1,55	283	524	-20 +60	8-18	5
Zinek/bromid	1,83	1,6	238	429	+10 - +50	-	12-15
Zinek/vzduch	1,6	1,1	825	1320	0 - +45	-	-
Hliník/vzduch	2,73	1,4	2980	8135	+10 - +60	-	-
Železo/vzduch	1,3	1	960	1250	-20 - +45	-	15
Zinek/vzduch	1,6	1,1	825	1320	0 - +40	-	-
Regenesys (PSB, Zn/Br)	1,5	1,2	27	41	+10 - +50	8-12	5-10
Vanad Redox	1,4	1,25	21	29	+10 - +50	6-10	5-10
Sodíko-sírové (NaS)	2,08	2	375	755	+300 - +350	5-6	-
Sodík/niklchlorid	2,58	2,47	305	787	+250 - +350	3-6	-
Li-C/LiCoO <sub>2</sub>	3-4	3-4	100	360	-20 - +60	-	-
Li-C/LiNi <sub>1-x</sub> Co <sub>x</sub> O <sub>2</sub>	3-4	3-4	-	-	-20 - +45	2,5	<3,5
Li-C/LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (polymerní elektrolyt)	3-4	3-4	105	400	-20 - +60	3	<2,5

Tab. 10.4: Srovnání baterií [9]

## 10.5. Akumulační systémy vhodné pro energetiku

V energetice se akumulátory používají již dlouho. Jednak jako staniční baterie a zálohové baterie převážně v jaderných elektrárnách, kde slouží pro případ náhlého výpadku napětí. Tyto bloky akumulátorů musí zajistit bezpečné napájení ochrany a přidružených provozů nutných k udržení reaktoru v povolených mezích. Většinou se jedná o velkoobjemové akumulátory a velkou kapacitou, ale malým napětím. Proto se články zařazují sériově-parallelně. Dřívější provedení bylo skleněné, dnes jsou měněny za modernější systémy (někdy i bezúdržbové).

V současné době je stále velký nárůst instalovaného výkonu z obnovitelných zdrojů energie (především FV elektráren). Regulace velkého počtu nestabilních zdrojů je problematická. Proto je otázka akumulace elektrické energie důležitá. Jestliže fluktuace výkonu neodpovídá aktuální potřebě trhu s elektřinou je nutné odpojení zdrojů nebo minimálně omezování jejich výkonu. Tyto změny se projevují ve větším opotřebování strojů a zařízení, které může vést až k prodloužení servisních hodin. Tyto aspekty se následně projevují do ekonomiky celých jednotek.

## 10.5.1 Baterie pro primární potřeby

Baterie pro primární potřeby jsou ve většině případů starší konstrukce, ale osvědčených typů. Nasazení těchto prostředků je podmíněno vynikající spolehlivostí i za cenu vyšší údržby. Jako příklad nasazení můžeme uvést již zmiňované jaderné elektrárny. Stále se spoléhá na olověné akumulátory, které bývají ve většině případů mírně modernizované. Dalšími typy baterií jsou hydroxidové baterie, které také vynikají svojí spolehlivostí.

## 10.5.2 Baterie pro sekundární činnosti

Baterie pro sekundární činnost se rozumí systémy, které nejsou náročné na obsluhu a jejich případný výpadek nezpůsobí výrazné škody. Do této kategorie můžeme zařadit veškeré průtokové baterie, které jsou mimořádně vhodné pro dlouhodobou akumulaci energie z OZE, popřípadě přímo v distribučních nebo přenosových sítích, kde v jednotlivých rozvodnách mohou plnit funkci jakési kompenzace toků výkonů.

Velikost baterií zde není na závadu a výhody z nepřerušeno provozu, malá údržba, menší kapacita ale rychlé přizpůsobování se situaci (rychlost reakce do 2 ms) dělá z těchto baterií vynikající prostředek.

Těž baterie NaS jsou ve svém vývoji daleko a dnes je možné na trhu koupit jednotky o nominálním výkonu 1 MW a kapacitě 12 MWh. Tyto akumulační prostředky slouží právě v uzlech distribučních sítí. V budoucnu se počítá s nasazením právě na OZE.

Lithiové baterie nejsou vhodné příliš pro energetiku. Jejich zatím stále vysoká cena a relativně malá životnost je pasuje do role malých baterií pro startování například záložních generátorů, popřípadě pro malé aplikace FVE.

## 10.6. Akumulační systémy vhodné pro OZE

### 10.6.1 Specifikace vhodných akumulačních systémů

Pro každou aplikaci jsou vhodné odlišné systémy. Jak uvádí tabulka 10.5, je zejména pro FVE důležité, kde se instalace nachází. K tomu je nutné přizpůsobit i výběr akumulačního systému. [10]

Systémový identifikátor	Třída 1	Třída 2	Třída 3	Třída 4
Solární frakce	100%	70-90%	okolo 50%	<50%
Akumulační velikost (dny)	3->10	3.5	1.3	okolo 1
<i>Důležité vlastnosti baterií</i>				
Počet cyklů	nízký (<300)	←→		vysoký (>1200)
Schopnost odolat dlouhou dobu v hlubokém vybití	Důležité	←→		Méně důležité
Nízké samovybití	Důležité (<1% za měsíc)	←→		Méně důležité (5% za měsíc)
Opatření proti kyselému vrstvení	Důležité	←→		Méně důležité
Odpor vůči korozi	Důležité	←→		Méně důležité

**Tab. 10.5: Přehled důležitých vlastností pro FVE baterie [10]**

V současné době jsou stále ještě používány olověné akumulátory s tekutým elektrolytem, tak zejména nastupující generace gelových akumulátorů, které jsou bezpečnější v provozu, vyžadují minimální údržbu a nehrozí u nich příliš velké sulfatování. Tak kvůli jejich ceně i schopnosti hlubokých vybití a častých cyklů. Lithiové baterie se začínají používat u malých aplikací, zejména v hybridních systémech malých rodinných domů.



**Obr. 10.19: Olověné akumulátory v reálné aplikaci [10]**

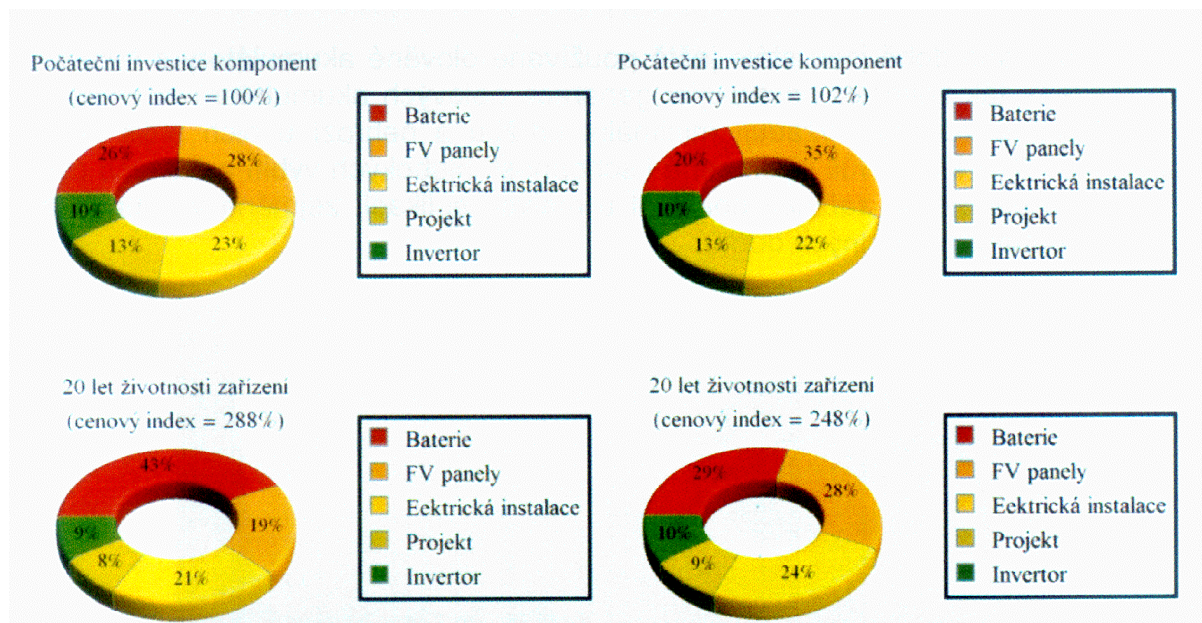
Níže uvedený příklad (obrázek 10.20) ilustruje důležitost integrace samotného zařízení a nákladů na provoz. Baterie vždy zvýší náklady na provoz systémů (minimálně při počáteční investici) ve většině autonomních provozů. Například olověné baterie mají nižší pořizovací náklady, jejich cena již příliš klesat nebude. Cena akumulace může klesat pouze pokud budeme nasazovat zařízení s větší specifickou energetickou hodnotou.

U moderních zásobníků energie je limitující zatím vyšší cena za kWh elektrické energie při dodávce a nižší účinnost těchto zařízení, než dosahují v současné době klasické olověné baterie. Další zdražení energie, potažmo instalace je stěží akceptovatelné spotřebiteli.

Akumulace energie (jak tepelné, tak elektrické) bude v budoucnu velice důležitá. V současnosti je potřeba akumulátorů vnímána především z pohledu obnovitelných zdrojů, které svým charakterem jsou stochastickými výrobkami energie.

Udržitelnost rozvoje společnosti je s OZE bezpodmínečně spjata. Jakýkoliv neobnovitelný zdroj je časově omezen. Dalším pozitivem úložišť energie je relativní energetická nezávislost a soběstačnost státu.

V neposlední řadě se skladiště energie uplatní v již dříve zmíněných tzv. chytrých sítích, které budou schopny vyhodnocovat aktuální potřeby zákazníků.



**Obr. 10.20: Porovnání nákladů FVE systému ze dvou hledisek.**

Grafy vlevo řeší systém, který je navržen na malou cenu komponent, tedy na počáteční cenu. Grafy vpravo ukazují výsledný stav optimalizovaný na náklady na životnost zařízení. Přesné náklady na počáteční investici (horní grafy) a náklady na životnost zařízení (spodní grafy) počítají s anuitní metodou a jsou normalizovány pro počáteční investici pro systém optimalizovaný na cenový index = 100%. Výchozí parametry: výroba 1500 kWh, efektivní úroková míra 6%; životnost komponent: FV 20let, elektronika 15let, baterie odpovídají ze zkoušek a simulací viz [10].

### Akumulace pro malé vodní elektrárny

Malé vodní elektrárny (MVE) stejně jako velké vodní elektrárny lze dobře předikovat z hlediska průtoku na vodních stavech. Náhlé změny se zde neodehrávají pouze, stojí-li MVE přímo pod nádrží, která je akumulací charakteru. Zde se ovšem s tímto jevem počítá a je vysloveně poptávám ze strany regulátora trhu s elektřinou.

### Akumulace pro fotovoltaické elektrárny

Pro malé aplikace jsou vhodné zejména elektrochemické systémy nebo moderní setrvačníky. Mimořádně vhodné je použití baterií zejména v domovních instalacích. Průmyslové aplikace vyžadují komplexnější přístup a návrh.

FVE mají zvýšené požadavky na akumulaci, protože stochastické změny výkonů jsou větší než například také u kritizovaných VTE. Na systémy je kladen požadavek okamžité dodávky energie, popřípadě okamžité krytí nadvýroby. Zde není možné použít systémů pracujících ve velkých časových intervalech (již řádově desítky sekund).

Z výše uvedených metod jsou vhodně průtokové baterie typu REDOX, či lithium-iontové nebo stále ještě klasické olovené akumulátory (ovšem s výhradami), jak již bylo řečeno několikrát výše.

## **Akumulace pro větrné elektrárny**

Větrné elektrárny mají stejné požadavky jako FVE. Nejedná se již o malé výkony jako v předešlé úvaze, ale velké celky – větrné parky. Pro ně (například Kryštofovy Hamry, kde celkový instalovaný výkon je 42 MW) jsou vhodné menší jednotky založené na systému CAES nebo AA-CAES, přečerpávací vodní elektrárny (nutné elektrické propojení a vhodné geofyzikální podmínky) a s výhradou vodíkové hospodářství. Daná vhodnost systému závisí na ekonomické propozici.

Specificky u VTE Kryštofovy Hamry je měsíční průměrný výkon 10,5 MW, tj. 25,0 % instalovaného výkonu, maximum pak 42,2 MW.

Pro představu stochastické výroby je zde uvedena bilance provozu farmy [10]:

- 3,6 % času nedodává nic,
- 59 % času dodává 20 % instalovaného výkonu a méně,
- 82 % času dodává 50 % instalovaného výkonu a méně.

Naopak, více než:

- 50 % instalovaného výkonu dodává pouze po 18 % času,
- 80 % instalovaného výkonu dodává pouze po 7 % času,
- 90 % instalovaného výkonu dodává pouze po 3 % času ,
- zbytek jsou špičky, tvořící až již zmíněných 42 MW sumarizačně.

## **Akumulace u zdrojů využívajících biomasu**

Zde je vhodná akumulace prostřednictvím tepelné energie, zejména systému Ruths s využitím tepelných čerpadel. Všeobecně se akumulace prostřednictvím tepelné energie vyznačuje vysokou mírou efektivity a velké kapacity (v poslední době se uvažuje o využití i latentního tepla). Z hlediska biomasy není ovšem potřeba velkých akumulátorů energie. Již sama biomasa je akumulátor energie. Tudíž návrh zařízení v tomto případě by byl neefektivní a ekonomicky těžko odůvodnitelný, vyjma náhlých změn termodynamických požadavků odběru.

## 10.7 Otázky ke studiu

- 1) Akumulace elektrické energie, způsoby, důvody přehled
- 2) Rozdělení akumulčních systémů, technicko ekonomické důvody
- 3) Požadavky pro stanovení výkonu akumulční kapacity
- 4) Které fáze přeměny se uplatňují v procesu akumulace
- 5) Princip mechanických akumulčních systémů a jejich vlastnosti
- 6) Přečerpávací elektrárny jako akumulční systémy- vlastnosti a účinnost
- 7) Akumulace energie v systému AACAS
- 8) Vlastnosti a rozdělení průtokových baterií
- 9) Přehled baterií a jejich vlastnosti- princip olověných článků
- 10) Princip činnosti, vlastnosti a použití sodíkových a lithiových baterií
- 11) Princip činnosti a použití NCd baterií
- 12) Chemická akumulace – palivové články
- 13) Princip tepelné akumulace
- 14) Princip akumulace v superkapacitorech
- 15) Porovnejte jednotlivé typy akumulátorových systémů
- 16) Akumulční systémy pro OZE, druhy a vlastnosti

## 10.7. Literatura

- [1] ESA (2009), dostupné z URL: <<http://www.electricitystorage.org/ESA/technologies/>>, datum citace: 18.3.2010
- [2] Gatzert, Ch. The Economics of Power Storage. Oldenbourg Industrieverlag, München. (2008), 254 pages. ISBN 978-3-8356-3138-0
- [3] Grazzini, G., Milazzo, A. Thermodynamic analysis of CAES/TES systems for renewable energy plants. Renewable Energy, Volume 33, Issue 9, September 2008, Pages 1998-2006, ISSN 0960-1481
- [4] Gregor J.; Uher J.; Radil L. Nové možnosti akumulace velkých objemů elektrické energie. In Proceedings of the 9th International Scientific Conference EPE 2008. 2008. p. 67 - 71. ISBN 978-80-214-3650-3.
- [5] Jirsa, M. Vysokoteplotní supravodiče a akumulace elektrické energie, Cyklus přednášek 2010 EGÚ Praha, seminář č. 6. Praha 2010
- [6] Kiehne, H., A. Battery technology handbook. Expert Verlag, Renningen-Malsheim. 2003, 543 pages. ISBN: 0-8247-4249-4
- [7] Kratochvíl T. Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 80s.
- [8] Krbal, M. Výroba elektrické energie větrnými elektrárnami a možnosti její akumulace. Bakalářská práce. Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2007
- [9] Linden D., Reddy B.T. Handbook of batteries, The McGraw-Hill Companies, Inc. (2002), 1506 pages. ISBN 0-07-135978-8
- [10] Luge A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. ISBN: 0-471-49196-9, John Wiley & Sons, 2010
- [11] Matoušek, A. Výroba elektrické energie, Skriptum, Vysoké učení technické Brno, 2005
- [12] Radil L.; Bartošík T.; Mastný P. Problems of Wind Power Plants from Point of View of Grid. In Energy Problems and Environmental Engineering, WSEAS e-journal Energy and Environment. WSEAS Press. 2009. p. 369 - 373. ISSN 1790-5095.
- [13] Radil, L. Eliminace diskontinuity dodávky energie z obnovitelných zdrojů. Pojednání o dizertační práci. Brno (2010).
- [14] Ries, G., Neumueller, W., H. Comparison of Energy Storage in flywheels and SMES. Physica C 357-360. 2001, pp 1306 – 1311.
- [15] Shively, D., Gardner, J., Haynes, T., Ferguson, J. Energy Storage Methods for Renewable Energy Integration and Grid Support. 2008 IEEE Energy
- [16] Thelen R.F.; Gattozzi, A.; Wardell, D.; Williams, A. A 2-MW Motor And ARCP Drive for High-Speed Flywheel. Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE , vol., no., pp.1690-1694, Feb. 25 2007-March 1 2007
- [17] Velek, V.: Zkušenosti z provozu větrného parku 21x2 MW Kryštofovy Hamry – II. In: ČK CIRED 2009, Tábor, ČR, číslo referátu: 10, 1-10
- [18] Webová stránka: [coml631csgjs7/2wp0uz/nasbattery.gif&w=524&h=276&ei=8vbfTpmsB4WC8gPyleTvBA&zoom=1&iact=hc&vpx=733&vpy=167&dur=2667&hovh=163&hovw=310&tx=190&ty=73&sig=118423196168522567698&page=1&tbnh=108&tbnw=205&start=0&ndsp=30&ved=1t:429,r:4,s:0&biw=1243&bih=941](http://coml631csgjs7/2wp0uz/nasbattery.gif&w=524&h=276&ei=8vbfTpmsB4WC8gPyleTvBA&zoom=1&iact=hc&vpx=733&vpy=167&dur=2667&hovh=163&hovw=310&tx=190&ty=73&sig=118423196168522567698&page=1&tbnh=108&tbnw=205&start=0&ndsp=30&ved=1t:429,r:4,s:0&biw=1243&bih=941), citováno dne: 5.12.2011
- [19] Zhong, Y.; Zhang, J.; Li, G.; Liu, A. Research on Energy Efficiency of Supercapacitor Energy Storage System. Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on , vol., no., pp.1-4, 22-26 Oct. 2006
- [20] Remy, H. Anorganická chemie -I.díl, Praha 1961, SNTL